VISIT…

П. В. Пляскин,
В. В. Федоров,
Ю. А. Буханов

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Допущено Министерством электротехнической промышленности в качестве учебника для техникумов

МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1983

ББК 31.294
П 40
УДК 621.32.001.66(07

Рецензенты: В. Ф. Шмонин (Полтавский электротехнический техникум), В. С. Литвинов (Московский ордена Ленина энергетический институт)

Пляскин П. В. и др.

П 40 Основы конструирования электрических источников света/ П. В. Пляскин, В. В. Федоров, Ю. А. Буханов. Учебник для техникумов.— М.: Энергоатомиздат, 1983. — 360 с., ил.

В пер.: 80 к.

Приведены необходимые сведения об источниках света, данные о наиболее важных и широко применяемых конструкционных материалах. Рассмотрены методология и этапы конструирования источников света. Подробно проанализированы вопросы конструирования трех главных типов источников света: ламп накаливания, люминесцентных ламп и газоразрядных ламп высокого давления.

Для учащихся техникумов по специальности 0632. Может быть полезен для инженерно-технических работников, занятых разработкой и производством источников света.

П $\frac{2302060000-352}{051(01)-83}$ 127-83

ББК 31.294
6П2.19

ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ ПЛЯСКИН
ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ ФЕДОРОВ
ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БУХАНОВ

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Редактор В. Г. Боос
Редактор издательства Т. Н. Платова
Технический редактор О. Н. Адаскина
Корректор М. Г. Гулина

ИБ № 772

Сдано в набор 25.11.82 Подписано в печать 17.03.83
Т-06951 Формат 84 × 108 1/32 Бумага кн.-журн. № 2
Гарнитура литературная Печать высокая
Усл. печ. л. 18,9 Усл. кр.-отт. 19,05 Уч.-изд. л. 22,17
Тираж 9000 экз. Заказ 3006 Цена 80 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-54, Валовая, 28

© Энергоатомиздат, 1983

ПРЕДИСЛОВИЕ

Производство электрических источников света в нашей стране представляет собой крупную, быстро развивающуюся самостоятельную подотрасль промышленности. Она требует систематического пополнения квалифицированными кадрами инженеров и техников. Особенно велика потребность в конструкторах, воплощающих идеи в законченные конструкции различных источников света.

Для подготовки техников-конструкторов по источникам света в электротехнических техникумах в составе специальности № 0632 «Электроосветительные приборы и установки» предусмотрен среди других предмет «Основы конструирования электрических источников света».

Предлагаемая книга написана в соответствии с учебной программой по этому предмету, утвержденной Министерством электротехнической промышленности в 1978 г., и является учебником для техникумов, в которых указанный предмет изучается. В связи с наличием в книге большого количества методических и справочных материалов она может быть полезной и инженерам, занимающимся разработкой источников света, а также другим инженерно-техническим работникам, занятым в области светотехники.

Учитывая также, что читателями могут быть техники-конструкторы и инженеры-конструкторы, авторы особое внимание уделили в книге методам расчета ламп и их элементов, применяемым способам конструирования, выбору необходимых конструкционных материалов, классификации и параметрам источников света, изложению зависимостей параметров ламп от принятых конструктивных решений, а также методологии и порядку проведения опытно-конструкторских работ с учетом специфических особенностей источников света. В

книге рассмотрены также некоторые вопросы, касающиеся принципов работы источников света и характера протекающих в них физических процессов, и отдельные элементы технологии. Но сделано это весьма кратко, так как аналогичный материал подробно изложен в учебниках, написанных по другим предметам специальности № 0632 «Электроосветительные приборы и установки».

Введение, разд. первый (гл. 1—4) и разд. второй (гл. 5—10) написаны канд. техн. наук П. В. Пляскиным; разд. третий (гл. 11—15) — канд. техн. наук В. В. Федоровым; разд. четвертый (гл. 16—22) — Ю. А. Бухановым.

При написании учебника использованы широко известные светотехникам работы по источникам света докторов наук А. П. Иванова, Г. Н. Рохлина, М. М. Гуторова, канд. техн. наук В. С. Литвинова, В. М. Скобелева, З. С. Вознесенской, Л. Г. Ульмишека. Авторы выражают благодарность кандидатам технических наук В. Г. Боосу, В. С. Литвинову и В. Ф. Шмонину, замечания и предложения которых были учтены при работе над книгой.

Предлагаемый учебник — первый опыт написания книги по основам конструирования источников света. Поэтому авторы с особой благодарностью примут все замечания и предложения, направленные на улучшение книги. Предложения просим направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая набережная, д. 10, Энергоатомиздат.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Значение электрических источников света. Человек знакомится со светом с первых дней своей жизни и затем все время им широко и свободно пользуется. Поэтому, очевидно, свет кажется явлением привычным и обыденным, легко доступным и понятным. Однако это далеко не так. Человек давно понял, что Солнца, Луны и других естественных источников света ему недостаточно. Он вынужден был сам заняться созданием искусственных источников света, для чего природа дала ему все необходимое. Нельзя сказать, что человек легко и быстро решил эту задачу. Решая ее, он использовал костер и лучину, факел и каганец, свечу, масляную и керосиновую лампы, различные газовые светильники. На смену пламенным источникам света, представлявшим собой открыто горящие вещества, пришли разнообразные электрические источники света. Сначала появились лампы накаливания с угольным, затем с вольфрамовым телом накала, а позже наряду с лампами накаливания широко распространились высокоэффективные газоразрядные источники света.

Путь развития искусственных источников света — это тяжелый и сложный путь творческих исканий людей. И он далеко не закончен. Учение о свете, путях создания и использования его искусственных источников продолжает оставаться, как и многие сотни лет назад, одной из увлекательнейших областей науки и техники. И не только увлекательнейших, но и совершенно необходимых для дальнейшего улучшения условий труда и жизни людей, для общественного прогресса [1, 3, 8].

На большую общественную и социальную значимость светотехники, а значит и искусственных источников света, как ее основы, не раз обращали внимание видные общественные деятели и представители науки. В ноябре 1920 г. в выступлении на открытии электростанции в деревне Кашино В. И. Ленин говорил: «Вы видите, ваша деревня Кашино пускает электричество. Это только одна деревня.

Но нам важно, чтобы вся страна была залита светом»[1]. Академик С. И. Вавилов в книге «О «теплом» и «холодном» свете» писал: «Свет фактически удлиняет сознательное существование человека, и в этом прежде всего его великое значение». В архивах С. И. Вавилова имеется такая запись, указывающая на большую хозяйственную значимость света: «Хороший свет так же нужен, как хорошая машина». Очень верно отметил член-корреспондент АН СССР Л. Д. Бахрах в статье «Тайна света» («Социалистическая индустрия», 15. 02. 74) следующее: «Свет сейчас становится таким универсальным орудием, которое, подобно электричеству и радиоволнам, способно обеспечивать технический прогресс в самых различных областях».

Следует заметить, что под источниками света здесь (как теперь и везде) подразумеваются источники, излучающие энергию не только в видимой области спектра (от 380 до 770 нм), но также в ультрафиолетовой (от 10 до 380 нм) и инфракрасной (от 770 до 10^6 нм) областях, т. е. во всей оптической части спектра. Для краткости здесь и дальше будет применяться термин «источники света», а иногда просто «лампы» вместо «искусственные электрические источники оптического излучения».

Искусственные источники света проникли сейчас во все отрасли народного хозяйства, во все сферы жизни и деятельности людей и используются там с большой эффективностью. Доказано, что только за счет улучшения освещения можно на 5 — 6 % увеличить производительность труда (а на предприятиях с напряженной зрительной работой — еще выше), повысить качество продукции, снизить брак, предотвратить несчастные случаи, снизить утомляемость работающих, сохранить зрение.

Источники света все более преобразуют промышленную технологию и все чаще выступают в роли орудия труда. Например, применение инфракрасных ламп типа ЗС-3 для сушки окрашенных кузовов автомобилей дало возможность сократить продолжительность сушки в 2 — 3 раза по сравнению с сушкой нагретым воздухом. Применение специальных источников света с заданным спектром излучения позволяет ускорить протекание ряда поверхностных и объемных технологических процессов (фотолитография, множительная техника, сушка лаковых и эмалевых покрытий; получение сложных органических и кремнийорганических соединений; фармацевтическая, пищевая промышленности; получение синтетических моющих средств и т. д.).

[1] В. И. Ленин об электрификации. М.: Политиздат, 1964, с. 119.

Общеизвестна высокая эффективность применения источников оптического излучения в сельском хозяйстве. Так, при ультрафиолетовом облучении кур их яйценоскость увеличивается на 18 % с одновременным улучшением некоторых показателей качества яиц. Облучение яиц сельскохозяйственных птиц на инкубаторских станциях, наиболее эффективное в зимнее время, приводит к повышению выводимости цыплят на 8 %, утят — на 17 %. Облучение свиноматок в зимний период повышает темпы роста молодняка, привесы его увеличиваются до 20 %. Дополнительное искусственное облучение рассады овощей в тепличных хозяйствах позволяет на 15 — 20 дней ускорить созревание овощей, на 25 — 30 % повысить урожай. Себестоимость овощей за счет применения искусственного облучения рассады снижается на 15 — 20 %. Стоимость облучательных установок окупается за один год.

Источники света оказывают влияние на все отрасли народного хозяйства (промышленность, сельское хозяйство, транспорт и связь), на благоустройство и световое оформление городов, на быт людей, на науку, культуру, медицину и многие другие области человеческой деятельности. Их постоянное совершенствование и умелое использование активно содействуют повышению эффективности общественного производства, подъему качества продукции, улучшению условий жизни людей. А именно эти главные задачи и поставлены XXV съездом КПСС перед советским народом.

Сейчас СССР имеет мощную индустрию светотехнических изделий, основанную на прочной научной базе. Годовой выпуск источников света исчисляется миллиардами (в 1980 г. выпущено около 2,3 млрд. шт. вместо 2859 тыс. шт. в 1913 г.), а световых приборов — десятками миллионов штук (в 1980 г. произведено более 70 млн. шт. вместо нескольких десятков тысяч в 20-х годах). В больших масштабах осуществляется выпуск высокоэффективных газоразрядных источников света и осветительной арматуры для них, в результате чего доля светового потока от этих источников света в общем световом потоке, идущем на цели освещения, достигла 66 %. Номенклатура источников света превысила 2000 наименований, ассортимент световых приборов составляет несколько тысяч. Однако этого недостаточно. В материалах XXV съезда КПСС были сформулированы требования, обращенные непосредственно к светотехникам:« ... быстрыми темпами развивать производство ... экономичных источников света ..., расширять

производство ... разнообразных осветительных приборов...». XXVI съезд КПСС потребовал «Обеспечить выпуск новых экономичных источников света с повышенными светоотдачей и сроком службы». И эти задачи будут, несомненно, выполнены.

Краткий исторический обзор развития электрических источников света. В настоящее время главенствующее положение в светотехнике занимают источники света, основанные на использовании различных свойств электричества. Известно, что при прохождении электрического тока через проводник последний нагревается; это свойство элек-

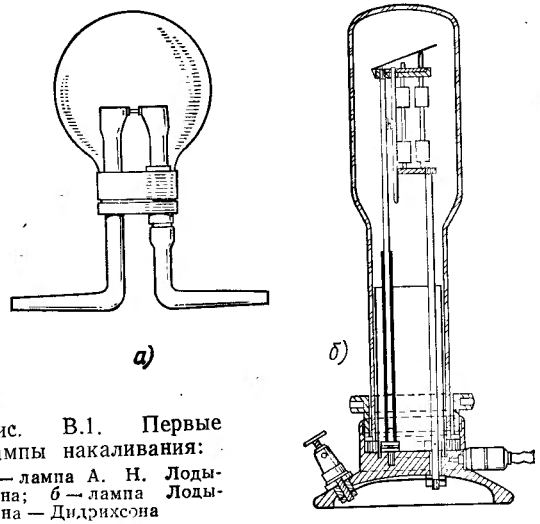


Рис. В.1. Первые лампы накаливания:
а — лампа А. Н. Лодыгина; *б* — лампа Лодыгина — Дидрихсона

тричества легло в основу создания тепловых источников света — ламп накаливания. Если к двум электродам, помещенным в пространство, заполненное инертным газом, подвести напряжение, то при определенных условиях между электродами возникнет электрический разряд, сопровождающийся свечением. Это явление легло в основу создания разнообразных типов газоразрядных ламп. Открытие люминофоров — веществ, способных преобразовать поглощаемую ими энергию в видимое излучение (люминесцировать), позволило создать, например, люминесцентные и электролюминесцентные источники света, в которых на люминофоры воздействуют соответственно энергии ультрафиолетового излучения и электрического поля.

Электрические источники света — детище XIX и главным образом XX века. Наиболее быстрое развитие они

получили в последние 50 — 60 лет. Назовем в хронологическом порядке важнейшие события на пути совершенствования электрических источников света, позволяющие проследить развитие научной и конструкторской мысли.

В 1802 г. русский физик В. В. Петров открыл явление электрической дуги между угольными электродами и отметил ее световые свойства, подсказав тем самым возможность использования этого явления для целей освещения.

Вскоре после открытия в 1800 г. теплового действия электрического тока начались опыты по получению света

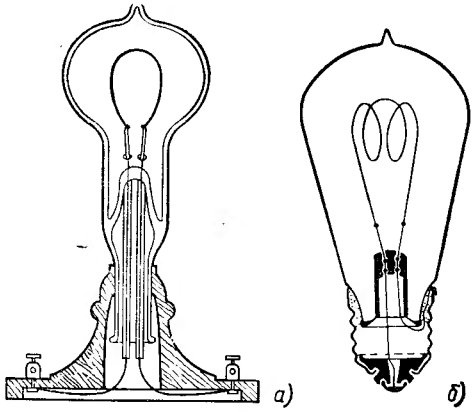


Рис. В.2. Лампы с угольной нитью:
а — одна из первых ламп Эдисона; *б* — промышленный образец лампы

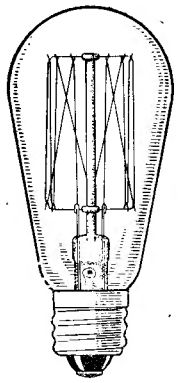


Рис. В.3. Вакуумная лампа с прямой вольфрамовой нитью

путем накаливания проводников током. Многочисленные работы в этой области многие годы не давали удовлетворительных результатов. Лишь в 1872 г. успех сопутствовал русскому изобретателю и конструктору А. Н. Лодыгину, который предложил источник света, в принципе схожий с современной лампой накаливания (рис. В.1,*а*). Он заключил в стеклянный баллон угольный стерженек, выпиленный из реторного[1] угля, и пропустил через него ток. Уголек разогревался и ярко светился. Кислород внутри баллона поглощался за счет сгорания части угля (вакуумной техники тогда не было). Оставшаяся часть угля относительно долго работала, излучая свет. Позже лампа была усовершенствована В. Ф. Дидрихсоном (рис. В.1,*б*), который разместил в баллоне несколько угольных стерженьков, автоматически переключавшихся по мере перегорания.

[1] Уголь, полученный при сухой перегонке дерева.

В 1876 г. русский изобретатель П. Н. Яблочков использовал для получения света электрическую дугу. В лампе Яблочкова, которая вошла в историю под названием «свеча Яблочкова» и представляла собой открытую угольную дугу, в качестве электродов были применены два угольных стержня, расположенных параллельно и разделенных промежутком из смеси каолина с магнезией.

В 1879 г. американский изобретатель Т.-А. Эдисон усовершенствовал лампу А. Н. Лодыгина, применив для тела накала угольный волосок, полученный обугливанием длинных и тонких бамбуковых волокон, и откачав из баллона

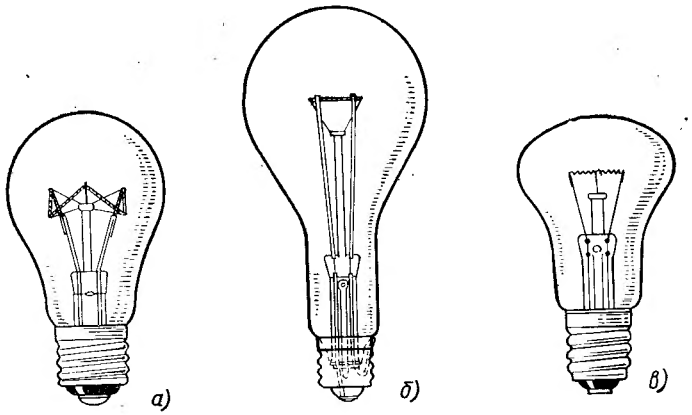


Рис. В.4. Вакуумные и газополные лампы накаливания:
а — спиральная вакуумная лампа; *б* — спиральная газополная лампа; *в* — биспиральная криптоновая лампа

воздух (рис. В.2,*а*). Конструкция лампы оказалась достаточно технологичной, что позволило организовать промышленное производство ламп с угольной нитью (рис. В. 2,*б*). Лампы накаливания начинают широко внедряться в практику электрического освещения во многих странах, в том числе в России.

В 1890 г. А. Н. Лодыгин демонстрировал лампу с телом накала в виде нити из тугоплавкого металла — молибдена. Эта идея оказалась очень плодотворной. Для изготовления тела накала пытались применять платину, осмий, цирконий, тантал и, наконец, вольфрам, который вытеснил впоследствии все другие металлы. Первые образцы ламп с применением вольфрама появились в 1903 г., в 1906 г. начался промышленный выпуск вакуумных ламп с прямой вольфрамовой тянутой нитью (рис. В.3).

В 1913 г. американский ученый И. Ленгмюр предложил наполнять лампу накаливания нейтральным газом и применять спирализованное тело накала вместо нитевидного. Эти меры позволили уменьшить температурное распыление вольфрамовой проволоки и за счет этого увеличить продолжительность горения (срок службы) лампы. И. Ленгмюру принадлежит теоретическая и практическая разработка спиральных вакуумных и газополных ламп (рис. В.4,*а*, *б*). В 1914 г. были изобретены газополные лампы накаливания с биспиральным (дважды спирализованным) телом накала. Но они долго не получали практического применения из-за сильного провисания тела накала. Только в 1935 г., после разработки технологии изготовления формоустойчивого вольфрама, началось их массовое производство. С 1936 г. в качестве газов-наполнителей лампы стали применять криптон (рис. В.4,*в*) и ксенон.

Практическое использование свечения электрического разряда в газе для целей освещения началось в 1893 г., когда американский инженер Ф. Мур предложил конструкции светящихся трубок, наполненных разреженными газами (азот и углекислота). Этому событию предшествовали исследования многих ученых в области создания источников тока, получения вакуума, изучения свойств и разновидностей газового разряда. В 1910 г. для светящихся трубок стали применять неон, аргон и другие газы, что позволило упростить их конструкцию. Параллельно создавались лампы и светящиеся трубки с парами металлов. Первой такой лампой, использующей свечение ртутных паров, была ртутная лампа И. Репьева, предложенная в 1879 г. В 1900—1901 гг. в эти лампы были введены конструктивные усовершенствования, которые сделали их удобными для практического применения. В результате начатых в 1904 г. работ, связанных с использованием для ртутных ламп кварцевых колб, была создана надежная конструкция ламп с металлическими вводами (1912—1913 гг.) и твердыми оксидными катодами (1930—1932 гг.). Эти лам-

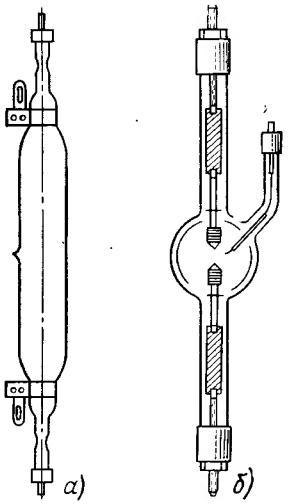


Рис. В.5. Газоразрядные лампы высокого (*а*) и сверхвысокого (*б*) давления

пы были интенсивными источниками излучения в ультрафиолетовой области спектра. На рис. В.5 приведены два типа газоразрядных ламп высокого и сверхвысокого давления. Первая (типа ДРТ), в цилиндрической колбе, является эффективным источником ультрафиолетового излучения, а вторая (типа ДРШ), с короткой дугой в шаровой кварцевой колбе, наполненная ртутными парами, обладает высокой яркостью, в десятки и сотни раз превосходящей

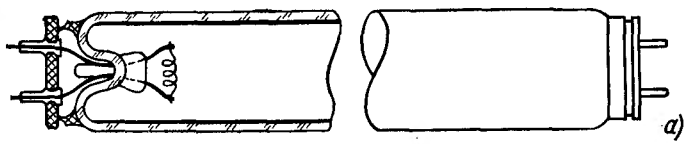
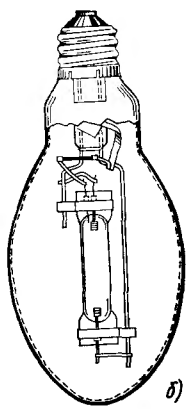


Рис. В.6. Люминесцентные лампы:
а — низкого давления; *б* — высокого давления (ДРЛ)



яркость ламп накаливания. В 1919 г. появились и начали распространяться лампы с парами натрия низкого давления. В конце 30-х годов начались исследования по созданию интенсивных источников света с малой длительностью свечения (импульсные лампы). Однако, несмотря на значительно более высокий, чем у ламп накаливания, КПД, указанные выше газоразрядные лампы не нашли широкого применения для общего освещения, так как они имеют линейчатый спектр излучения и сильно искажают цвет освещаемых предметов.

В 1931 г. академик С. И. Вавилов предсказал возможность применения в газоразрядных лампах люминофоров для преобразования ультрафиолетового излучения ртутного разряда в видимое излучение с непрерывным спектром. Эта идея была реализована в люминесцентных лампах низкого давления (рис. В. 6,*а*), массовый выпуск которых начался в СССР в 1938 г. Они стали первыми газоразрядными источниками света, которые наряду с лампами накаливания нашли массовое применение для освещения. Этому способствовали высокая эффективность люминесцентных ламп (в настоящее время световая отдача в

2 — 5 и срок службы в 5 — 15 раз выше, чем у ламп накаливания), а также технологичность конструкции, позволившая организовать крупное высокомеханизированное производство [10]. Широкое распространение люминесцентных ламп подняло освещение промышленных и общественных зданий на принципиально новый качественный уровень. На рис. В. 7 показаны некоторые типы люминесцентных ламп (прямые, желобковые, кольцевые, U-образные, W-образные).

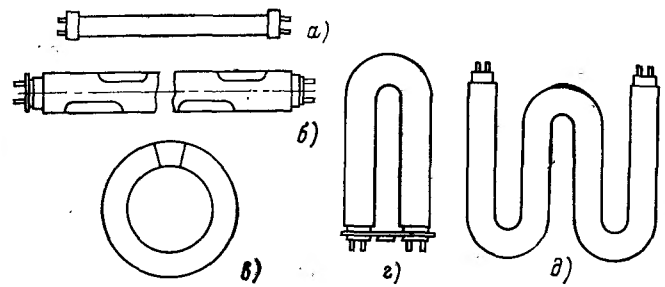


Рис. В.7. Некоторые типы люминесцентных ламп низкого давления:
а — прямая; *б* — желобковая; *в* — кольцевая; *г* — U-образная; *д* — W-образная

Начиная с 1951 г. начинают быстро распространяться дуговые ртутно-кварцевые лампы высокого давления с нанесенным на внутреннюю стенку внешней колбы люминофором — лампы ДРЛ (рис.В.6,*б*). Их световая отдача достигает сейчас 60 лм/Вт, а срок службы 12—15 тыс. ч. Производство этих ламп хорошо механизировано.

1959 г. ознаменовался крупным событием, открывшим новую страницу в развитии тепловых источников света, были созданы галогенные лампы накаливания в кварцевой колбе [20]. Введение галогенов (например, йода) в лампу обеспечивало при определенных условиях обратный перенос испарившихся частиц вольфрама со стенок колбы на тело накала. При этом колба в процессе работы лампы остается прозрачной, световой поток — более стабильным, что позволяет существенно уменьшить размеры лампы по сравнению с обычными лампами той же мощности. Относительно малые размеры этих ламп и высокая прочность их кварцевых оболочек позволили повысить давление наполняющей лампы среды до 4 — 5·10^5 Па (3000—

4000 мм рт. ст.) и тем самым существенно увеличить срок службы галогенных ламп (примерно в 2 раза) по сравнению с обычными лампами накаливания. В СССР в настоящее время создано и выпускается свыше 100 типоразмеров галогенных ламп накаливания, используемых для инфракрасного нагрева, прожекторного освещения, кино-, теле- и фотосъемок, автотранспорта, оптических приборов и других целей (рис. В.8).

Изобретение галогенных ламп накаливания навело на мысль использовать циклы в парах простейших химических соединений в газоразрядных лампах [3, 4]. Это позволяет создать лампы, сочетающие высокую световую отдачу и хорошую цветопередачу, присущие люминесцентным лампам, с высокой мощностью излучения, которой отличаются ртутные лампы высокого давления. За последние 10—15 лет много сделано для практической реализации этой идеи. Уже начали выпускаться так называемые металлогалогенные дуговые лампы (типа ДРИ), т. е. ртутные лампы высокого давления с введением йодидов натрия, таллия, индия и др. Световая отдача этих ламп достигает 80—90 лм/Вт, что в 1,5—2 раза больше, чем у аналогичных ламп типа ДРЛ.

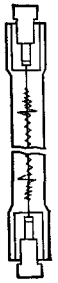


Рис. В.8. Галогенная лампа накаливания

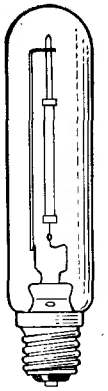


Рис. В.9. Натриевая лампа высокого давления

Важным достижением последнего времени является разработка и освоение производства натриевых ламп высокого давления (рис. В.9). Создание таких ламп (типа ДНаТ), имеющих световую отдачу до 110 — 120 лм/Вт, срок службы около 20 тыс. ч и удовлетворительную цветопередачу, стало возможным в связи с созданием светопрозрачных трубок-колб из поликристаллической окиси алюминия. Такие колбы могут работать при более высокой температуре, чем кварцевые, и хорошо противостоят воздействию разряда в парах щелочных и щелочноземельных металлов [3, 5].

Развитие источников света, совершенствование конструкций происходили на основе использования достижений фундаментальных наук, в тесной связи с развитием других отраслей науки и техники. Важнейшими научными предпосылками явилось открытие теплового действия электрического тока (1800 г.), открытие электрической дуги и возможности получения от нее света (1802 г.), исследование и формулирование законов теплового излучения тел (вторая половина XIX в.), развитие теории светящегося электрического разряда в газе (работы английского физика М. Фарадея, начатые в 1838 г.), развитие исследований в области техники освещения и облучения. К главным техническим предпосылкам развития источников света можно отнести изобретение гальванического элемента, электрификацию, создание вакуумной техники, получение вольфрамовой проволоки, развитие техники обработки стекла, получение кварцевого стекла, организацию промышленного получения азота, аргона, криптона и ксенона и снижение их стоимости и др.

Отметим основные пути и направления дальнейшего развития электрических источников света. Главная проблема — повышение эффективности преобразования электрической энергии в световую, увеличение световой отдачи источников света. В тепловых источниках света это может быть достигнуто за счет отыскания новых материалов для тела накала, совершенствования конструкции тел накала и оптимизации окружающих их сред, дальнейшего исследования возвратных (регенеративных) циклов и совершенствования на этой основе галогенных ламп накаливания, развития работ по применению антистоксовых люминофоров в лампах накаливания и др. (см. гл. 10).

Важными научно-техническими задачами в области газоразрядных ламп являются улучшение цветности натриевых ламп высокого давления; повышение срока службы ламп типа ДРИ; повышение стабильности светового потока практически всех типов газоразрядных ламп и прежде всего люминесцентных ламп низкого давления; создание люминесцентных ламп с улучшенной цветопередачей и в колбах специальной формы для жилых помещений; развитие люминесцентных ламп повышенной интенсивности; создание безбалластных газоразрядных ламп; расширение ассортимента ламп типов ДРЛ, ДРИ, ДНаТ и др.

Требование повышения эффективности преобразования электрической энергии в световую не является абсолют-

ным. На него накладываются ограничения в связи с необходимостью обеспечить разумную долговечность источников, необходимый спектральный состав излучения, достаточно низкую стоимость ламп, удобство их эксплуатации в осветительных приборах и т. п. Поэтому оценка эффективности источников света как преобразователей энергии должна осуществляться по критериям, учитывающим эти ограничения. В области создания таких критериев сделано уже немало [1].

Роль конструирования в совершенствовании источников света. В решении задач совершенствования и создания новых источников света важная роль принадлежит конструктору — специалисту, который создает конструкцию источника света. Любая теоретическая идея получения света не будет иметь практического значения, пока не воплотится в конструкцию конкретной лампы.

Сконструировать источник света — значит определить состав и расположение входящих в него деталей, узлов и других компонентов. При этом выбранная конструкция должна обеспечивать нормальное протекание физических и других процессов, заложенных в основу функционирования данного источника света, и получение заданных параметров лампы. Из этого следует, что прежде чем приступить к конструированию лампы, нужно понять теоретические принципы, на которых должен работать источник света, и выяснить основные требования к его параметрам. Эти вопросы излагаются в курсе «Источники света и пускорегулирующая аппаратура», знание которого необходимо конструктору. Конструкция лампы тесно связана с конструкцией светильника. Конструкторы ламп и светильников должны работать в тесном контакте с тем, чтобы совместно наилучшим образом решить ту или иную осветительную задачу. В связи с этим конструктор ламп должен изучить курс «Световые приборы и установки». При конструировании должны учитываться технология производства и технологическое оборудование, которые применены при изготовлении лампы. Без этого нельзя сделать технологичную конструкцию. Установленный порядок проведения опытно-конструкторских работ (ОКР) по светотехническим изделиям требует, чтобы каждая новая конструкторская разработка источника света, а также и светильника имела полную проработку в части технологии и оборудования. Из этого следует, что изучаемый в техникумах курс «Технология производства источников света» имеет прямое отношение к работе по конструированию ламп. Следует указать также на важность изучения курса

«Электротехнические и светотехнические материалы», знание которого облегчит конструктору выбор материалов при разработке ламп.

Чтобы принимать правильные решения при конструировании источников света, необходимо знать историю развития конструкторской мысли, тенденции и типовые решения, имеющиеся связи и зависимости параметров ламп от конструктивных решений, способы обеспечения высокой эффективности разработки и высокого качества, методы расчета и оптимизации конструкции и ее элементов, рациональную последовательность проведения опытно-конструкторских работ, порядок оформления конструкторской документации. Оказать помощь во всем этом должен настоящий учебник.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Глава первая

КЛАССИФИКАЦИЯ, ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

С физической точки зрения источником света может быть названа любая материальная система, излучающая электромагнитную энергию в оптической области спектра. В технике источниками света называют приборы, служащие для преобразования какого-либо вида энергии в энергию оптического излучения.

Источники света могут быть как естественными (светящие небесные тела, молния и др.), так и искусственными (свеча, электрическая лампа и др.). В современных искусственных источниках света для преобразования в свет используется преимущественно электрическая энергия. Такие источники света называются электрическими.

Электрические источники света можно классифицировать (разделить на классы, группы) по многим признакам, однако главными из них являются: механизм генерирования света (вид излучения); назначение (область применения); конструктивно-технологические особенности.

По первому признаку (вид излучения) электрические источники света делятся на три больших класса: 1) тепловые; 2) люминесцентные; 3) смешанного излучения.

К тепловым электрическим источникам оптического излучения относятся прежде всего разнообразные лампы накаливания, в которых свет излучается проводником (вольфрамовым телом накала), накаленным протекающим через него электрическим током. К этому классу можно также отнести: электрические дуги между угольными электродами, основным источником излучения которых является поверхность электрода; газокалильные лампы, в которых излучают сетки, накаленные внешней теплотой; электрические инфракрасные излучатели.

Действие тепловых источников света основано на законах теплового излучения (§ 5.1).

К *люминесцентным* источникам света относятся такие источники, свечение которых основано на явлении люминесценции. По определению С. И. Вавилова, люминесценция — это «...избыток излучения над температурным излучением, если это избыточное излучение обладает конечной длительностью примерно от 10^{-10} с и больше»[1]. Люминесценция не подчиняется законам теплового излучения. В основе ее лежит индивидуализированный перевод атомов и молекул вещества в возбужденное состояние, возвращаясь из которого в нормальное состояние, они излучают накопленную энергию в виде света. В зависимости от рода применяемой первичной (возбуждающей) энергии люминесценция делится на различные виды: электролюминесценция (свечение веществ под действием электрического поля), фотолюминесценция (свечение веществ при облучении их светом), хемилюминесценция (свечение в результате химической реакции) и др.

Типичными представителями люминесцентных источников света являются трубчатые люминесцентные лампы низкого давления (см. разд. 3), а также дуговые ртутные лампы типа ДРЛ (см. разд. 4), в которых одновременно с электролюминесценцией паров ртути в плазме электрического разряда используется фотолюминесценция нанесенного на стенку колбы люминофора под действием излучения столба разряда. К этому же классу относятся различные безлюминофорные газоразрядные лампы тлеющего, дугового, высокочастотного и импульсного разрядов (трубки тлеющего разряда, лампы с парами натрия, импульсные лампы и др.) (см. разд. 4).

Источниками света *смешанного* излучения называются такие, в которых имеют место одновременно и люминесценция, и тепловое излучение. Представителем этого класса источников света является, например, дуга высокой интенсивности, в которой свечение дуги обусловлено явлением электролюминесценции редкоземельных элементов, поступающих из фитиля анода в межэлектродное пространство, а свечение раскаленного анода является тепловым излучением.

По назначению (областям применения) все электрические источники света можно разделить на следующие основные классы: 1) общего назначения — для общего освещения помещений и открытых пространств; 2) местного освещения — для освещения индивидуальных рабочих мест; 3) транспортные; 4) для сигнализации и индикации; 5) для оптических систем и приборов; 6) метрологические; 7) для технологических целей; 8) для специальных светотехнических систем и установок.

По конструктивно-технологическим признакам источники света разделяют прежде всего на три крупных класса: 1) лампы накаливания; 2) газоразрядные лампы низкого давления; 3) газоразрядные лампы высокого давления. Каждый из этих классов имеет специфические конструктивно-технологические особенности. Для ламп накаливания такими особенностями, объединяющими все лампы накаливания в один класс, являются: вольфрамовое спирализованное тело накала, относи-

[1] Вавилов С. И. Собр. соч., т. 2. Л.: Изд-во АН СССР, 1949, с. 282.

тельно малые габариты, высокий уровень механизации и автоматизации сборочных операций. Газоразрядные лампы низкого давления, входящие во второй класс, объединяет наличие анода и катода, обеспечивающих электрический разряд в лампе; присутствие ртутных паров в лампе и наличие люминофора на колбе; как правило, относительно большая длина ламп. Класс газоразрядных ламп высокого давления отличается следующими общими признаками: специфическая конструкция анода и катода; наличие деталей из кварца и тугоплавкого стекла, а также других тепло- и термостойких материалов; использование в большинстве случаев двух колб (кварцевая горелка и наружная колба); применение фольговых молибденовых впаев усложненной конструкции; сравнительно невысокая производительность технологического оборудования.

Последовательность изложения материала в настоящем учебнике соответствует основным конструктивно-технологическим классам. В последующих разделах показана возможность дальнейшего расширения и углубления классификации источников света как по указанным основным признакам (вид излучения, назначение ламп, конструктивно-технологические особенности), так и по ряду других частных признаков.

Изложенная классификация положена в основу системы условных обозначений источников света. Условное обозначение каждого типоразмера источников света состоит, как правило, из четырех элементов.

Первый элемент — от одной до четырех букв, характеризующих группу источников света по важнейшим физическим и конструктивным особенностям. Например, для газоразрядных ламп: Т — лампа тлеющего разряда, Д — дугового разряда, И — импульсная, Л — люминесцентная и т. д. Для ламп накаливания: В - вакуумная моноспиральная, Г — газополная моноспиральная, Б — биспиральная, БК — биспиральная криптоновая и т. д. Для ламп накаливания с покрытиями на колбах к первым буквам условного обозначения добавляют буквы: МТ — матированная, МЛ — молочного цвета, ОП — опаловая. В ряде случаев лампы накаливания (преимущественно специальные) первого элемента в обозначении не имеют.

Второй элемент — буквенное сочетание из одной-двух букв, обозначающее: для ламп накаливания — название лампы или характерную особенность, указывающую на назначение, например А — автомобильная, Ж — железнодорожная, С — судовая, СМ — самолетная, ПЖ — прожекторная, К — кинопроекционная, КМ — коммутаторная, Р — рудничная, МН — миниатюрная, СМН — сверхминиатюрная, Д — свечеобразная, ЗК, ЗС, ЗШ — зеркальная и т. д.; для ламп тлеющего и дугового разрядов — среду, в которой происходит разряд (Г — гелий, К — криптон, Кс — ксенон, Р — ртуть и т. д.) и характерную особенность или назначение ламп (Л — люминесцентная, Т — трубчатая, С — для светокопирования и т. д.); для люминесцентных ламп — цветность свечения

(Д — дневного света, ДЦ — дневного света с правильной цветопередачей, Б — белая, ТБ — тепло-белая) и назначение или характерную особенность ламп (Ф — для фотосинтеза, Э — эритемная и т. д.).

Третий элемент — цифровое выражение, определяющее: для ламп накаливания — номинальное напряжение в вольтах и через дефис — номинальную мощность в ваттах, силу света в канделах, ток в амперах или световой поток в люменах в зависимости от принятой маркировки данного вида ламп; для двухспиральных ламп накаливания — номинальное напряжение в вольтах и через дефис — номинальные мощности или номинальные значения других параметров первой и второй спиралей, соединенные знаком +; для ламп тлеющего разряда — наибольший ток лампы в миллиамперах; для ламп дугового разряда — мощность в ваттах или напряжение питания в вольтах; для люминесцентных ламп — мощность в ваттах и в случае необходимости ставится буквенное выражение, характеризующее схему включения (например, БП — быстрого пуска); для импульсных фотоосветительных ламп — энергию разряда в номинальном режиме с наименьшей частотой вспышек в джоулях; для импульсных ламп-строботронов — номинальную мощность в ваттах.

Четвертый элемент — отдельная от третьего элемента цифра, определяющая порядковый номер разработки. Для ламп первой разработки четвертый элемент отсутствует.

Воспользовавшись этой системой, можно так расшифровать условные обозначения некоторых ламп: БК МТ 220-100-2 — лампа накаливания биспиральная, криптоновая, в матированной колбе, напряжением 220 В, мощностью 100 Вт, вторая разработка; А 12-21+6 — лампа накаливания автомобильная, номинальным напряжением 12 В, двухспиральная, силой света 21 и 6 кд; ЛТБЦ40 — лампа люминесцентная, тепло-белого света, правильной цветопередачи, мощностью 40 Вт; ДРЛ400 — лампа дугового разряда, ртутная, люминесцентная, мощностью 400 Вт.

1.2. ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Под *параметрами* понимают электрические, светотехнические, ресурсные, геометрические, экономические и другие существенные свойства ламп, определяющие их качество и условия применения. От уровня параметров зависит эффективность световых приборов, светотехнических установок и систем, оптических и других устройств, в которых работают лампы.

Значения параметров, при которых лампы должны работать и которые лампы должны иметь при заданных условиях эксплуатации, называются *номинальными*. Фактические значения обычно в той или иной мере отличаются от номинальных по разным причинам (нестабильность свойств материалов, технологии и др.), но не могут выходить за преде-

лы допусков, установленных в государственных стандартах (ГОСТ) и технических условиях (ТУ).

Для источников света характерны следующие параметры: 1) электрические, 2) световые, 3) спектральные и цветовые, 4) геометрические и конструктивные, 5) механические и климатические, 6) долговечность, надежность, стабильность, 7) экономичность.

Электрические параметры — номинальные напряжение, мощность, ток.

Номинальное *напряжение* U обычно принимается равным напряжению электрической сети или автономного источника питания, к которым лампа должна подключаться. Номинальная *мощность* P — это мощность, потребляемая лампой при номинальном напряжении питания. Номинальный *ток* I лампы является производной величиной от номинальных мощности и напряжения.

Световые параметры — световой поток, сила света, яркость.

Известно, что энергию, переносимую излучением оптической области спектра, называют энергией излучения Q и выражают в джоулях (Дж). В светотехнике обычно пользуются понятием мощности излучения, которая называется *потоком излучения* Φ_e, он выражается в ваттах и определяется из равенства

$$\Phi_e = dQ/dt.$$

Световой поток Φ — это часть потока излучения, которая вызывает зрительное ощущение. Поток излучения и световой поток связаны соотношением

$$\Phi = \int_{380}^{770} \varphi(\lambda) K(\lambda)\, d(\lambda) = 680 \int_{380}^{770} \varphi(\lambda) V(\lambda)\, d\lambda, \qquad (1.1)$$

где $\varphi(\lambda)$ — спектральная плотность потока излучения, измеряемая в Вт/нм и характеризующая его спектральное распределение (рис. 1.1); $K(\lambda)$ — спектральная световая эффективность излучения; $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность (рис. 1.2).

Максимальная спектральная световая эффективность $K(\lambda)_{max} \approx 680$ лм/Вт имеет место при освещении сетчатки однородным излучением с длиной волны $\lambda = 555$ нм (желто-зеленый участок спектра).

За единицу светового потока принят люмен (лм). Например, миниатюрная лампа МН2,5-0,5 для карманного фонаря излучает световой поток, равный 8 лм, аргоновая лампа накаливания Б215-225-100—1350 лм, а люминесцентная лампа ЛБ40—3200 лм.

Сила света I_V определяется отношением светового потока к телесному (пространственному) углу ω, в котором он распространяется:

$$I_V = d\Phi/d\omega. \qquad (1.2)$$

Ось телесного угла принимается за направление силы света. Сила света измеряется в канделах (кд), а телесный угол — в стерадианах (ср).

Лампа, равномерно излучающая световой поток, равный 1 лм, внутри телесного угла в 1 ср, имеет силу света 1 кд (1 кд=1 лм/1 ср).

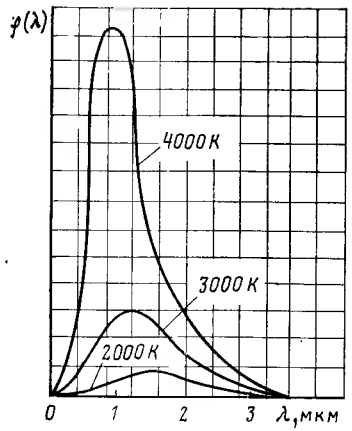
Некоторые лампы характеризуются средней сферической силой света $I_{V\theta}$, под которой понимают среднее из значений сил света во всех направлениях пространства:

$$I_{V\theta} = \Phi/4\pi, \quad \text{или} \quad \Phi = 12{,}57 I_{V\theta}. \qquad (1.3)$$

Из (1.3) следует, что полный световой поток лампы, излучающей по всем направлениям пространства свет силой в 1 кд, равен 12,57 лм.

Яркость L — это отношение силы света в данном направлении к площади проекции светящей поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению:

$$L = I_V/S \cos\alpha, \qquad (1.4)$$



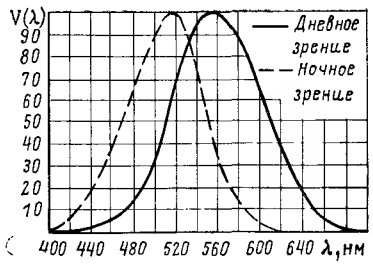


Рис. 1.1. Спектральная плотность потока излучения при различных температурах источника

Рис. 1.2. Относительная спектральная световая эффективность

где S — площадь светящей поверхности, м²; α — угол между направлением наблюдения светящей поверхности и перпендикуляром к ней. Единица яркости — кандела на квадратный метр (кд/м²).

Кроме названных выше, имеются также параметры, определяющие характер и эффективность распределения излучения (силы света) лампы в пространстве. Они особенно важны для ламп-светильников (зеркальных ламп, источников света со встроенными отражателями, люминесцентных рефлекторных ламп и т. п.). К параметрам светораспределения относятся прежде всего *кривые силы света* (см. рис. 5.8). Для оценки эффективности зеркальных ламп используются понятия: *коэффициент полезного действия* (отношение светового потока зеркальной лампы к световому потоку такой же лампы, но без зеркального слоя) и *коэффициент усиления* (отношение наибольшей силы

света зеркальной лампы к средней сферической силе света той же лампы без зеркального слоя). В некоторых лампах-светильниках нормируется *полезный угол рассеяния* — наибольший угол, в пределах которого сила света не снижается менее установленного значения, равного чаще всего 50% наибольшего значения.

Спектральные и цветовые параметры — спектр излучения, цветность, цветная температура, индекс цветопередачи.

Спектр излучения лампы — это распределение интенсивности ее оптического излучения по длинам волн (или частотам). Спектр представляют обычно в виде кривой спектрального распределения (спектрограммы). Спектры оптического излучения бывают сплошными (содержат всевозможные частоты, заключенные в некотором сравнительно широком интервале), полосатые (состоят из отдельных дискретных групп тесно расположенных спектральных линий) и линейчатые (представляют собой дискретные спектральные линии) (см. рис. 5.9).

В непосредственной связи со спектром излучения находится его *цветность*. Установлено, что ощущение того или иного цвета зависит прежде всего от спектрального состава поступающего в глаз потока излучения. Примерная связь между спектральным составом излучения и его цветностью приведены ниже [6]:

Диапазон длин волн, нм	Цвет излучения
770—620	Красный
620—590	Оранжевый
590—560	Желтый
560—500	Зеленый
500—480	Голубой
480—450	Синий
450—380	Фиолетовый

Если рассматривать монохроматическое излучение в очень узком участке спектра, то цвет излучения можно выразить длиной волны λ или соответствующей частотой. Труднее количественно оценить смесь цветов, которая воспринимается глазом как некоторый новый цвет. В этом случае цвет излучения обозначают *координатами цветности* x и y, каждой паре которых соответствует определенная точка (определенный цвет) на так называемом цветовом графике, построенном в прямоугольных координатах. Методы определения цветности изложены в § 11.3 на примере люминесцентных ламп.

Цветовая температура лампы $T_ц$ — это температура черного тела, при которой оно вызывает такое же цветовое ощущение, как и данная лампа в рабочем режиме. Для ламп накаливания в прозрачной бесцветной колбе цветовая температура на 50—100 К выше истинной температуры вольфрамового тела накала [9].

Спектральный состав излучения источника света существенно влияет на зрительное восприятие цветных объектов, обычно сравниваемое с восприятием тех же объектов, освещаемых дневным солнечным или условно белым светом [1]. Это влияние характеризуют *цветопередачей*. Качество цветопередачи оценивают так называемым *индексом цветопередачи источника света* R_a, который представляет собой численный показатель меры соответствия зрительных восприятий цветного объекта, освещаемого поочередно данной лампой и стандартным источником света. Чем больше R_a (максимальное значение R_a равно 100), тем выше качество цветопередачи. Различают частный индекс цветопередачи, когда освещается один объект или группа адекватных объектов, и общий индекс, относящийся к группе различных по цвету объектов. Методы оценки качества цветопередачи описаны в § 11.3 на примере люминесцентных ламп.

Геометрические и конструктивные параметры. Основные геометрические параметры: *габаритные размеры* (полная длина лампы и диаметр колбы); *присоединительные размеры* (они определяются в основном выбранным цоколем; он должен соответствовать патрону, для установки в который лампа предназначена); *высота светового центра* h — расстояние по оси лампы между плоскостями, проходящими через световой центр лампы и через определенную отметку на цоколе (в некоторых лампах — через вершину купола колбы). Высота светового центра ламп является размером, сопрягаемым с размером осветительного прибора, т. е. также является, в известном смысле, присоединительным размером. Она влияет на кривую силы света светового прибора. Нормирование высоты светового центра позволяет при смене ламп обеспечивать постоянство светораспределения светового прибора.

Основные конструктивные параметры: форма и расположение светящего тела (тела накала ламп накаливания, катодов и горелок газоразрядных ламп), конструкция ножки, форма колбы, тип цоколя.

Механические и климатические параметры. Основные механические параметры: *вибростойкость* и *вибропрочность* (способность ламп сохранять параметры при заданных частоте вибрации и ускорении в течение определенного времени); *ударостойкость* и *ударопрочность* (способность сохранять параметры при заданных ускорении и длительности ударных импульсов в течение времени, соответствующего установленному числу ударов); *прочность крепления цоколя к колбе* (способность цоколя противостоять приложенному к нему постепенно возрастающему до заданного значения крутящему моменту, измеряемому в ньютон-метрах — Н·м).

Вибрационные параметры — амплитуда, мм, частота, Гц, ускорение g тесно зависят друг от друга. На рис. 1.3 приведена номограмма, которая позволяет по двум известным вибропараметрам найти третий [9].

---

[1] Международный стандарт условно белого света при искусственном освещении воспроизводится источником А — специальной лампой накаливания, имеющей цветовую температуру 2854 К.

Климатические параметры: устойчивость к внешнему давлению и разрежению, устойчивость к температуре окружающей среды, стойкость против воздействия влаги и химически агрессивных сред. Значения этих параметров указываются в ГОСТ и ТУ.

Долговечность, надежность, стабильность. Долговечностью любого изделия называют календарную продолжительность работы его в часах (или других единицах времени) от начала эксплуатации (испытания) до момента наступления полной непригодности. Из этого следует, что под долговечностью источников света нужно понимать суммарное время горения лампы и ее нерабочего состояния (например, выключение днем). Однако для временной характеристики «жизнедеятельности» ламп принято использовать не долговечность, а параметр «продолжительность горения», который обычно называют сроком службы. При расчетах и конструировании ламп и проведении технико-экономических исследований удобно пользоваться следующими разновидностями срока службы (при номинальном напряжении питания):

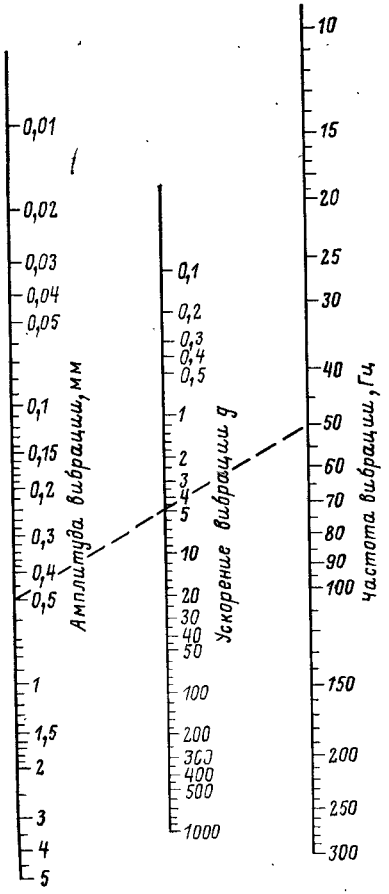


Рис. 1.3. Номограмма для определения вибропараметров

1. *Полный* срок службы $\tau_{полн}$ — суммарное время горения лампы в часах от момента включения до момента перегорания.

2. *Средний* срок службы τ — среднее арифметическое из полных сроков службы всех ламп, входящих в партию. Значение среднего срока службы (средней продолжительности горения), выраженное в часах, указывается в ГОСТ и ТУ. Средний срок службы практически является номинальным сроком службы, так как на него ориентируется конструктор при расчете и конструировании ламп.

3. *Гарантированный* срок службы $\tau_г$ — суммарное время горения любой лампы, выпущенной предприятием. Например, для ламп накаливания общего назначения $\tau_г$=700 ч при среднем сроке службы

τ=1000 ч. Предприятие обязано безвозмездно заменять лампы, не проработавшие гарантийного срока при соблюдении потребителем правил эксплуатации.

4. *Полезный* срок службы $\tau_п$ — экономически целесообразное суммарное время горения лампы или совокупности ламп. Нецелесообразность дальнейшей эксплуатации лампы чаще всего возникает тогда, когда ее световой поток становится слишком малым из-за происходящих в лампе процессов старения (лампа еще горит, но уже плохо светит). Поэтому полезный срок службы можно определить как суммарное время горения лампы, исчисленное от момента ее включения до момента, когда световой поток ее уменьшится до заранее установленного значения.

В связи с нестабильностью напряжения в осветительных сетях введен так называемый *реальный* срок службы $\tau_р$, под которым понимают среднюю продолжительность горения ламп в реальных условиях эксплуатации.

Под *надежностью* понимают способность ламп выполнять все заданные функции в определенных условиях эксплуатации в течение заданного времени при сохранении значений основных параметров в заранее установленных пределах. Надежность ламп оценивают по двум основным показателям: *наработкой на отказ* (суммарным временем горения до отказа, т. е. до снижения светового потока ниже установленного уровня или до нуля вследствие перегорания тела накала или незажигания лампы) и *вероятностью безотказной работы.* Эти показатели для ряда типов ламп, особенно специальных, регламентируются в ГОСТ и ТУ.

Надежность ламп тесно связана с их *стабильностью*, т. е. способностью ламп сохранять свои параметры неизменными (в пределах заданных граничных значений при работе в течение установленного промежутка времени). Требование стабильности относится прежде всего к световому потоку ламп. В нормативно-технической документации указаны предельно допустимые значения световых потоков ламп к концу номинального срока службы. Постоянство светового потока ламп в процессе их работы иногда оценивают по *коэффициенту стабильности* ν, т. е. по числу, на которое нужно умножить номинальное значение светового потока Φ, чтобы получить среднее его значение за срок службы $\Phi_{ср}$:

$$\nu = \Phi_{ср}/\Phi. \qquad (1.5)$$

Экономичность источников света. Электрические источники света — это физические приборы, преобразующие электрическую энергию в свет. Чем больше люменов получено на один ватт потребленной электрической мощности, тем экономичнее лампы. Поэтому главным показателем экономичности источников света является их *световая отдача* η_v, представляющая собой отношение излучаемого лампой светового потока к потребляемой мощности и измеряемая в люменах на ватт

(лм/Вт):

$$\eta_V = \Phi / P. \qquad (1.6)$$

Эффективность ламп характеризуется также материалоемкостью, трудоемкостью и себестоимостью изготовления.

Перечисленные параметры источников света можно условно разделить на *технические* (характеризующие излучательные и электрические свойства ламп) и *эксплуатационные* (характеризующие эффективность ламп в условиях эксплуатации). К первой группе относятся поток излучения, распределение излучения в пространстве, мощность и др., ко второй — КПД излучения, световой поток и световая отдача, сроки службы, надежность и др. [1].

Поскольку знание параметров ламп при конструировании очень важно, в разд. 2, 3 и 4 настоящего учебника приведены дополнительные сведения о параметрах, специфических для соответствующих групп источников света. В названных разделах даны также уравнения, графики и таблицы, описывающие взаимосвязь и взаимозависимость параметров и влияние на них различных факторов. Такого рода зависимости (аналитические или графические) часто называют *характеристиками*. К числу важнейших характеристик источников света можно отнести: зависимость параметров от времени горения ламп; влияние напряжения питания на параметры; зависимость параметров ламп от характера (состава и давления) внутриламповой среды; взаимозависимость срока службы и световой отдачи ламп (особенно в лампах накаливания); влияние различных конструктивно-технологических факторов на физико-химические процессы, протекающие в лампах, на тепловые режимы колб и других элементов, на параметры ламп и др.

1.3. НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Основные параметры ламп и методы их проверки приводятся в соответствующих ГОСТ и ТУ на источники света.

Стандарт как нормативно-технический документ устанавливает комплекс требований к источникам света. Он является также основным правовым документом, характеризующим качество продукции при заключении договоров на ее поставку и предъявлении рекламаций. В зависимости от характера устанавливаемых норм, правил и требований, сферы действия и области распространения стандарты подразделяются на следующие виды: стандарты общих технических требований, технических условий, правил приемки, типовых технологических процессов, методов и средств проверки и др.; стандарты государственные (ГОСТ), республиканские (РСТ), отраслевые (ОСТ), предприятий (СТП).

Технические условия — это нормативно-технический документ, подобно стандарту устанавливающий комплекс требований к источникам света и имеющий аналогичное стандарту правовое значение. Однако ТУ разрабатываются на основе соответствующих стандартов и в до-

Таблица 1.1. **Перечень основных государственных стандартов на источники света**

Номер ГОСТ	Наименование ГОСТ	Срок прекращения действия
15049-74	Лампы электрические. Термины и определения	Без ограничения
19190-73	Лампы накаливания электрические. Общие технические условия	01.01.86
2239-79	Лампы накаливания электрические общего назначения	01.01.86
1182-77	Лампы накаливания электрические для светильников местного освещения	01.01.84
1181-74	Лампы накаливания электрические железнодорожные	01.01.86
2023-75	Лампы накаливания электрические автомобильные	01.01.89
1608-78	Лампы накаливания электрические судовые	01.01.85
11085-79	Лампы накаливания электрические для светофоров железнодорожного транспорта	01.01.86
16301-80	Лампы накаливания электрические маячные	01.01.86
6940-74	Лампы накаливания электрические коммутаторные	01.01.84
2204-80	Лампы накаливания электрические миниатюрные	01.01.88
4019-74	Лампы накаливания электрические для киноаппаратуры	01.01.86
5011-77	Лампы накаливания электрические малогабаритные на напряжение 127 и 220 В, мощностью 25 Вт	01.01.85
13874-76	Лампы накаливания электрические инфракрасные зеркальные	01.01.85
9750-78	Лампы накаливания электрические для фотографии	01.01.85
7874-76	Лампы накаливания электрические прожекторные	01.01.86
12123-74	Лампы накаливания электрические рудничные	01.01.85
6825-74	Лампы люминесцентные ртутные низкого давления	01.01.87
16354-77	Лампы ртутные дуговые высокого давления	01.01.88
20401-75	Лампы дуговые ртутные трубчатые высокого давления	01.01.86
17616-80	Лампы накаливания электрические. Методы измерения световых и электрических параметров	01.01.91

полнение к ним, обычно охватывают небольшую группу однотипных источников света или один из них, имеют, как правило, меньший, чем стандарт, срок действия, отличаются от стандарта порядком утверждения.

В табл. 1.1 дан перечень основных ГОСТ на источники света, данные которых могут быть использованы в качестве аналогов при конструировании ламп.

Глава вторая

ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ МАТЕРИАЛОВ. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Наиболее характерными конструкционными материалами, отражающими специфические особенности и физическую сущность источников света, являются: 1) *тугоплавкие металлы* и *сплавы*, применяемые для тел накала ламп накаливания, катодов газоразрядных ламп, держателей тел накала, впаев и т. п.; 2) *стекла* различных видов; 3) *люминофоры* разных марок, преобразующие ультрафиолетовое излучение разряда в газоразрядных лампах в видимый свет; 4) *инертные газы*, применяемые для наполнения ламп; 5) *специальные материалы*, формирующие среду внутри лампы; 6) *вспомогательные* конструкционные материалы.

Большинство указанных материалов относится к категории *электровакуумных*. Это означает, что они должны быть пригодны для создания герметизированных вакуумных объемов и, работая в вакууме, не ухудшать его.

Важнейшими металлами, применяемыми при конструировании источников света, являются тугоплавкие металлы, к которым относятся вольфрам, молибден, тантал, ниобий, рений, цирконий и титан. Наиболее широко из них применяется в источниках света вольфрам, выполняющий наиболее ответственные функции.

Вольфрам W — тяжелый тугоплавкий металл светло-серого цвета. Плотность 19 300 кг/м^3, температура плавления 3650 ±50 К. Имеет низкое давление пара при высокой температуре. В нагретом состоянии пластичен, что позволяет получать весьма тонкие нити протяжкой через калиброванные отверстия. Используется в источниках света в виде проволок, а также прутков и прокатной жести. Из вольфрама изготовляют тела накала ламп накаливания, катоды газоразрядных ламп, держатели, вводы и выводы галогенных ламп накаливания и др. В § 7.1 приведены некоторые физические и технологические свойства

проволочного вольфрама и влияние на них вводимых в вольфрам примесей.

Молибден Mo — тугоплавкий металл серебристо-белого цвета. Плотность 10 200 кг/м^3, температура плавления 2895 К. Применяется главным образом в виде проволоки, а также прутков, лент, фольги и пластин из прокатанной жести. Из молибдена изготавливают держатели тел накала ламп накаливания, фольговые впаи для ряда типов ламп, некоторые вспомогательные детали в лампах. Используется также в качестве сердечника при изготовлении вольфрамовых биспиралей и многих видов спиралей. Кроме указанных выше, молибден обладает следующими свойствами: температурный коэффициент линейного расширения $51 \cdot 10^{-7}$ К$^{-1}$; удельное электрическое сопротивление $57{,}8 \cdot 10^{-3}$ Ом·мм^2/м; скорость испарения 5×10^{-6} г/(см^2·с) при 2500 К; по твердости, пределу прочности и модулю упругости некристаллизованный молибден, как и вольфрам, относится к металлам с высокими механическими свойствами; на воздухе молибден начинает окисляться при 350—400 °С; пары воды вызывают его быстрое окисление лишь при нагреве до красного каления; с ртутью и ее парами практически не взаимодействует.

Тантал Ta — металл серовато-белого цвета. Имеет плотность 16 600 кг/м^3, температуру плавления 3269 К, температурный коэффициент линейного расширения 66×10^{-7} К$^{-1}$; по скорости испарения занимает промежуточное положение между вольфрамом и молибденом. Легко куется и протягивается в холодном состоянии; хорошо сваривается с вольфрамом и молибденом; не взаимодействует с парами ртути, а также с галогенами до 150 °С. Применение тантала в производстве источников света обусловлено главным образом его способностью к поглощению газов при 700 — 1200 °С (пластинки из тантала монтируются в электродах некоторых газоразрядных ламп). Полоса из тантала применяется в качестве промежуточного материала при сваривании некоторых металлов.

Ниобий Nb близок по свойствам к танталу. Плотность 8500 кг/м^3, температура плавления 2688 К, температурный коэффициент линейного расширения $72 \cdot 10^{-7}$ К$^{-1}$. По скорости испарения занимает промежуточное положение между вольфрамом и молибденом. Может использоваться как газопоглощающий материал (при высокой температуре). Листовой ниобий применяется при изготовлении натриевых ламп высокого давления для герметизации керамической горелки в зоне вхождения в нее электродов.

Рений Re по цвету похож на платину; имеет плотность 21 030 кг/м³, температуру плавления 3453 К, температурный коэффициент линейного расширения $67 \cdot 10^{-7}$ $К^{-1}$, незначительную скорость испарения. По сравнению с другими тугоплавкими металлами рений химически наиболее устойчив; имеет более высокое, чем другие тугоплавкие металлы, удельное электрическое сопротивление; обладает хорошими механическими свойствами. Несмотря на весьма благоприятное сочетание положительных свойств, рений не нашел пока широкого применения при конструировании источников света. Однако *вольфрамореньевые сплавы* с разным содержанием рения (от 1 до 20 %) считаются перспективными для изготовления тел накала некоторых специальных ламп накаливания, имеющих относительно низкую температуру тела накала и предназначенных для эксплуатации в условиях повышенных механических нагрузок.

Цирконий Zr имеет плотность 6500 кг/м³ и температуру плавления 2118 К. *Титан* Ti имеет плотность 4500 кг/м³ и температуру плавления 1998 К. Оба металла применяются в производстве источников света преимущественно в качестве газопоглотителей: цирконий — в виде порошка, а титан — ленты. Титан применяется также как восстановитель для бариевых газопоглотителей; для этого порошкообразный титан спрессовывают с соединениями бария в небольшие таблетки.

Кроме тугоплавких металлов при конструировании источников света применяются также другие металлы и сплавы. Наиболее часто применяются *никель* — для электродов ламп, стоек, держателей, покрытия цоколей и др.; *медь* — для электродов и др.; *алюминий* — для катодов некоторых типов неоновых ламп тлеющего разряда, цоколей ламп и корпусов стартеров, для приготовления газопоглотителей и др.; *сталь* — в основном для изготовления внешних деталей источников света.

Используются также многие сплавы и композиции металлов: *ферроникель* (сплав железа с никелем) применяется в качестве плавкого предохранителя в газополных лампах накаливания, *константан* (сплав меди и никеля) используется для предохранителей ламп накаливания, *сплавы типа ковар* (сплавы на основе никеля и кобальта) предназначены для изготовления деталей, впаиваемых в стекло марки СЛ40-1 и в керамику, *сплавы железа и никеля с хромом* используются для изготовления впаев некоторых ламп.

При конструировании ламп применяются некоторые биметаллы: для впаев многих источников света — *платинит*, представляющий собой проволоку из стали марки 43Н, покрытую слоем меди (покрытие осуществляется гальваническим или механическим методом), содержание никеля в общей массе биметалла составляет 42,5 — 44 %, меди — 21 — 30 %; для некоторых целей — *алюминированное железо*, выпускаемое в виде лент разной длины и ширины. Основой этого биметалла служит железо «армко», а покрытием — алюминиево-кремниевый сплав.

В источниках света применяются различные металлы, улучшающие эмиссионные свойства катодов газоразрядных ламп (барий, калий, цезий и др.), а также участвующие в формировании внутриламповой среды (ртуть, натрий, таллий, индий, цезий, кадмий, галлий, барий, магний и др.), о чем подробнее будет указано ниже.

Особо следует отметить *ртуть* как один из важнейших рабочих материалов газоразрядных ламп. Это серебристая жидкость, единственный жидкий при обычной температуре металл. Имеет плотность 13 520 кг/м³, температуру плавления 234 К (— 39 °С), высокое давление насыщенных паров, большую скорость испарения; ее пары отличаются низким потенциалом ионизации по сравнению с инертными газами. Большинство металлов растворяется в ртути с образованием *амальгам*. Железо, вольфрам, тантал, графит, стекло, керамика, слюда с ртутью не взаимодействуют. Ртуть и ее пары вредны для человека; допустимая концентрация паров ртути в воздухе рабочих помещений — 0,01 мг/м³.

2.2. СТЕКЛО

В источниках света применяется *неорганическое* стекло. Это прозрачный (бесцветный или окрашенный) хрупкий материал, получаемый при остывании расплава, содержащего стеклообразующие компоненты (окислы кремния, бора, алюминия, фосфора, титана, циркония и др.) и окислы металлов (лития, калия, натрия, кальция, магния, свинца). По типу стеклообразующего компонента стекло подразделяют на силикатное, боратное, боросиликатное, алюмосиликатное, бороалюмосиликатное и др.

Условное обозначение различных марок стекла для источников света состоит из букв СЛ (стекло ламповое) и двух чисел, разделенных дефисом. Первое из них — округленное значение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) в интервале от +20 до

+300°C, второе — порядковый номер присвоения обозначений стеклу с одинаковыми значениями ТКЛР (номер разработки). Например, СЛ 96-1 означает: стекло ламповое с ТКЛР, равным $96 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}, первая разработка.

В зависимости от того, с каким металлом стекло образует согласованный спай, стекла разделяются на следующие основные группы: 1) вольфрамовую (обозначение СЛ 40-1), 2) молибденовую (ТКЛР от 52 до $54 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}); 3) платинитовую (ТКЛР от 92 до $98 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}); 4) переходную (СЛ 58-1, СЛ 86-1). Кроме того, выделяется кварцевая группа стекол (СЛ 5), титановая (СЛ 72 — СЛ 76) и железная (СЛ 120).

По температуре размягчения стекла делятся на легкоплавкие (мягкие) и тугоплавкие (твердые). У первых ТКЛР лежит в пределах $(80—120) \cdot 10^{-7}$ K^{-1}, у вторых не превышает $55 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}.

Среди *легкоплавких* стекол особенно распространены барито-силикатные и магнезиально-силикатные. Стекла СЛ 96-1, СЛ 96-12, СЛ 97-1 и СЛ 97-2 этой группы применяются для изготовления колб и ножек ламп накаливания и колб газоразрядных ламп низкого давления. Указанные стекла имеют относительно невысокие температуру размягчения, термостойкость и химическую стойкость; они достаточно дешевы. Для ножек люминесцентных ламп и прожекторных ламп применяют так называемое *свинцовое* стекло СЛ 93-1.

Тугоплавкие стекла относятся к боросиликатной SiO_2 и B_2O_3 (до 90% по массе) или алюмосиликатной SiO_2 и Al_2O_3 (в пределах 72 — 82% по массе) группам. Такие стекла применяются, например, для колб и ножек ламп ДРЛ (СЛ 40-1) и некоторых других газоразрядных ламп (СЛ 54-1, СЛ 54-2). Указанные стекла обладают высокими диэлектрическими свойствами, высокой температурой размягчения, повышенной термостойкостью и химической стойкостью, устойчивостью против кристаллизации при длительном нагреве.

Наиболее тугоплавким является прозрачное *кварцевое стекло* СЛ 5-1, состоящее из чистого кремнезема. Температура размягчения кварцевого стекла равна примерно 1600 °C. Оно может работать при 700 — 800 °C в течение тысяч часов и при 900 — 950 °C — сотни часов. Имея весьма низкий температурный коэффициент линейного расширения ($5{,}4 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}), кварцевое стекло обладает высокой термостойкостью. Оно имеет ряд других ценных свойств: высокие диэлектрические качества; повышенную

химическую стойкость по отношению к воде, большинству кислот (кроме плавиковой и ортофосфорной), парам ртути; высокую прозрачность в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Кварцевое стекло применяется для изготовления горелок (внутренних колб, в которых осуществляется разряд) газоразрядных ламп высокого давления, колб импульсных и трубчатых ксеноновых ламп, галогенных ламп накаливания и др.

Недостатком всех силикатных стекол является их слабая стойкость к разряду в парах щелочных металлов при повышенных температурах. Для ламп с парами этих металлов изготавливаются алюмоборосиликатные стекла, но они недостаточно стойки к воздействию атмосферного воздуха и их рабочие температуры не превосходят 380—480°C. Это делает их непригодными для ламп высокого давления с парами щелочных металлов. В связи с этим был разработан новый материал для колб, представляющий собой спеченную при высоких температурах *поликристаллическую окись алюминия* Al_2O_3. Этот материал обладает более высокими, чем кварцевое стекло, рабочими температурами (1500 — 1600 °C) и устойчив к воздействию паров щелочных металлов при высоких температурах, вплоть до 1500 — 1600 °C. Трубки из поликристаллической окиси алюминия позволили создать, например, натриевые лампы высокого давления (см. разд. IV).

При конструировании и производстве источников света используют также ряд других видов стекол. Например, некоторые лампы накаливания общего назначения изготавливают из *неодимового* стекла СЛ 95-1, значительно поглощающего в желтой, а также в зеленой, оранжевой и дальней красной областях спектра видимого излучения, придающего излучению лампы пурпурный цвет.

Для колб бактерицидных ламп ($\lambda_{max} = 254$ нм) и эритемных ($\lambda_{max} = 297$ нм) применяют специальные *увиолевые* стекла СЛ 96-4 и СЛ 96-5, пропускающие ультрафиолетовые лучи. Для изоляционного слоя цоколей применяют специальное *изоляционное стекло* (см. § 9.4).

Для изготовления колб ламп часто используются прозрачные *цветные* стекла, получаемые путем введения в шихту различных окрашивающих окислов. Например, окись кадмия придает стеклу светло-желтый цвет, окись железа — желто-зеленый, окись кобальта — темно-синий, окись меди — синий, окись марганца — красный и голубовато-фиолетовый и др. Широко применяются для изготовления колб также *непрозрачные* («глушеные») — *опаловые*

Таблица 2.1. **Физико-химические свойства и назначение электроламповых стекол (по ОСТ 16 0.800.356-76)**

Марка стекла	ТКЛР, $\times 10^{-7}$, °C^{-1}	Температура размягчения, °C	Термостойкость, °C, не менее	Границы зоны отжига, °C		T_{K100}, °C, не менее	Химическая стойкость (гидролитический класс)	Основное назначение
				Нижняя	Верхняя			
				Вольфрамовая группа				
СЛ 40-1	40±1	620	260	430	550	300	IV	Колбы и ножки ламп ДРЛ и ламп-фар для летательных аппаратов
				Молибденовая группа				
СЛ 52-1	52±1	585	180	410	535	285	V	Колбы и ножки ламп ДРЛ, колбы ламп-фар для автомобилей и с газоразрядными горелками
СЛ 53-1	53±2	630	140	—	—	325	—	Рубидий-, цезий- и натрийстойкое стекло в спектральных источниках света
СЛ 54-1	54±2	620	150	430	580	470	—	Колбы натриевых ламп низкого давления (внешний слой)
СЛ 54-2	53,5±2	665	160	490	640	—	—	То же (внутренний слой)
				Платинитовая группа				
СЛ 92-1	92,5±1	565	100	—	—	130	—	Цветные колбы ламп накаливания, в том числе микроминиатюрных
СЛ 93-1	$93{,}5^{+1}_{-1{,}5}$	500	100	360	450	325	III	Ножки люминесцентных и прожекторных ламп, колбы стартеров
СЛ 95-1	95±1,5	585	120	—	—	140	—	Колбы ламп накаливания декоративного и специального освещения
СЛ 96-1	96±1,5	560	110	410	520	140	V	Колбы ламп накаливания общего назначения и прожекторных ламп

Продолжение табл. 2.1

Марка стекла	ТКЛР, $\times 10^{-7}$, °C^{-1}	Температура размягчения, °C	Термостойкость, °C, не менее	Границы зоны отжига, °C		T_{K100}, °C, не менее	Химическая стойкость (гидролитический класс)	Основное назначение
				Нижняя	Верхняя			
СЛ 96-4	96±1	550	120	400	540	185	—	Колбы эритемных ламп
СЛ 96-5	96±1	560	125	410	520	180	—	Колбы бактерицидных ламп
СЛ 96-7	$100^{+1}_{-2{,}5}$	540	110	—	—	170	—	Изоляционный слой цоколей
СЛ 96-12	96±1	565	120	410	550	155	IV	Колбы люминесцентных ламп и ламп накаливания общего назначения
СЛ 96-13	96±1	560	120	—	—	—	—	Колбы ламп накаливания для фоторабот и каминов (медный рубин красного цвета)
СЛ 97-1	97±1,5	550	110	400	505	210	IV	Колбы люминесцентных ламп и специальных ламп накаливания, ножки ламп накаливания
СЛ 97-2	97±1	550	120	400	505	210	IV	Колбы бактерицидных ламп
СЛ 97-3	97±1	550	120	395	500	210	—	Колбы эритемных ламп
СЛ 98-1	98±1	550	100	—	—	160	—	Колбы медицинских ламп (кобальтовое стекло синего цвета)
				Переходная группа				
СЛ 58-1	58±1	575	170	440	555	190	—	Ножки мощных ламп накаливания
СЛ 86-1	86±1	600	130	425	545	230	—	То же

Примечание. Температура размягчения стекла соответствует вязкости 10^{10} Па·с; для СЛ 53-1—±20°C, для других марок—±10°C.

и *молочные* стекла, содержащие фториды натрия и кальция. Их не следует смешивать с *матированными* колбами, которые получают путем химической или механической обработки поверхности стекла.

В табл. 2.1 приведены основные физико-химические свойства наиболее распространенных электроламповых стекол. Указанный в ней *температурный коэффициент линейного расширения* характеризует способность стекла расширяться при нагревании и определяется методом прогиба двойной нити. *Температура размягчения* стекла соответствует температуре, при которой в определенным образом выбранном и нагруженном образце появляются достаточно ярко выраженные признаки размягчения (деформации). Приведенная в табл. 2.1 *термостойкость* стекла характеризует способность его выдерживать без разрушения резкие перепады температуры. Там же указаны значения *границ зоны отжига* различных стекол. Нижней границей зоны отжига (или точкой трансформации) называют минимальную температуру стекла, при которой внутренние напряжения в стекле начинают медленно исчезать; верхняя граница этой зоны — минимальная температура, при которой напряжения быстро и почти полностью исчезают. Из приведенных данных легко заметить, что верхняя температура отжига лежит относительно близко к температуре его размягчения. Следует также дать пояснения к *температурному коэффициенту удельного электрического сопротивления* стекла, обозначенному $T_{к\,100}$[1]. Стекло с меньшим $T_{к\,100}$ хуже противостоит повышенным электрическим нагрузкам. Среди стекол платинитовой группы наилучшим в этом смысле является многосвинцовое стекло СЛ 93-1, в состав которого входит 30% PbO. *Химическая стойкость* стекла характеризуется гидролитическим классом, к которому оно отнесено. Имеется пять таких классов, и, чем выше номер класса, тем стекло менее стойко к действию влаги. Химическую стойкость стекла определяют выщелачиванием стеклянного порошка в кипящей дистиллированной воде, последующим отделением и выпариванием получившегося раствора и определением массы сухого остатка на единицу объема раствора, что служит основанием для отнесения стекла (по имеющимся таблицам) к тому или иному гидролитическому классу. *Плотность* стекол, указанных в табл. 2.1, находится в пределах 2250—2710 кг/м³.

[1] Значение коэффициента соответствует температуре, до которой нужно нагреть данное стекло, чтобы его удельное электрическое сопротивление понизилось до 100 МОм·см.

Коэффициент пропускания света у стекол разных марок различен. Для стекол марок СЛ 96-1 и СЛ 96-12 толщиной 0,4—0,7 мм для области спектра 400—700 нм он должен быть не менее 96 %.

2.3. ЛЮМИНОФОРЫ

Люминофорами называют вещества, способные преобразовывать поглощаемую ими энергию в световое излучение (люминесцировать).

По химическому составу люминофоры разделяются на неорганические и органические. *Неорганические* люминофоры (кристаллофосфоры) применяются в люминесцентных лампах, электронно-лучевых трубках, рентгеновских экранах, индикаторах радиации и др. Их свечение обусловлено присутствием различных примесей-активаторов. *Органические* люминофоры (люмогены) используются для изготовления ярких флюоресцентных красок и люминесцирующих материалов, для проведения чувствительного люминесцентного анализа в химии, биологии, медицине и др.

По характеру поглощаемой энергии (или по способу возбуждения) неорганические люминофоры делятся на ряд видов: *фотолюминофоры* (возбуждение ультрафиолетовым и видимым светом), *электролюминофоры* (возбуждение электрическим полем), *радиолюминофоры* (возбуждение излучением радиоактивных препаратов), *катодолюминофоры* (возбуждение пучком электронов), *рентгенолюминофоры* (возбуждение рентгеновским излучением) и др. В производстве источников света применяются главным образом фотолюминофоры, возбуждаемые ультрафиолетовым излучением, которые принято называть *ламповыми люминофорами*.

Ко всем ламповым люминофорам предъявляется ряд общих требований. Например, люминофор должен в минимальной степени отражать падающее на него возбуждающее излучение и обеспечивать высокую эффективность преобразования поглощенного излучения в видимый свет (т. е. обеспечивать высокий квантовый выход). Люминофор, находясь на колбе газоразрядной лампы, должен быть прозрачен для собственного излучения и видимого излучения ртутного разряда. Суммарное излучение люминофора и разряда должно обеспечивать требуемый от ламп спектр излучения. Люминофор должен быть достаточно стабильным по яркости свечения в процессе эксплуатации ламп. Это значит, что он должен быть устойчивым против вредного влияния паров ртути и примесей газовой среды, ко-

ротковолнового излучения разряда, температуры и других факторов. Люминофор должен иметь определенный гранулометрический состав, обеспечивающий, с одной стороны, прочное закрепление его на колбе, а с другой — минимальное отражение падающего на него возбуждающего излучения.

Для люминесцентных ламп низкого давления в настоящее время применяются в основном две группы люминофоров: 1) *галофосфатные* люминофоры на основе галофосфата кальция, активированного сурьмой и марганцем. Общая химическая формула этих люминофоров — $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(F, Cl) : Sb, Mn$; их излучение состоит из двух полос — сурьмяной с максимумом 480 нм и марганцевой с максимумом 580 нм. Галофосфатные люминофоры малочувствительны к различным примесям, обладают высокой стабильностью в условиях ртутного разряда люминесцентных ламп, практически не оказывают токсического действия и имеют сравнительно низкую стоимость; 2) *ортофосфатные* люминофоры, типичным представителем которых является люминофор Л-42ДН, имеющий формулу $(Ca, Zn)_3 \cdot (PO_4)_2 : Sn$ и генерирующий три полосы излучения — 390, 500 и 610 нм. Применение ортофосфатных люминофоров, излучающих в красной области спектра бо́льшую долю энергии по сравнению с галофосфатными, позволило улучшить цветопередачу люминесцентных ламп. Ортофосфатный люминофор Э-2, имеющий формулу $(Ca, Mg)_3 \cdot (PO_4)_2 : Tl$, применяется для эритемных ламп, так как его максимум излучения (305 нм) близок к максимуму эритемной чувствительности кожи человека (около 300 нм).

Для газоразрядных ртутных ламп высокого давления применяются следующие основные люминофоры: 1) *фторгерманат магния, активированный марганцем* (Л-40), имеющий формулу $Mg_4GeO_{5,5}F : Mn$ и излучающий пять узких полос с максимумами в областях 626, 634, 643, 654 и 660 нм; 2) *ортофосфатные люминофоры, активированные оловом*, имеющие формулы $(Sr, Mg)_3 \cdot (PO_4)_2 : Sn$; $(Sr, Zn)_3 \cdot (PO_4)_2 : Sn$; $(Ca, Mg)_3 \cdot (PO_4)_2 : Sn$; эти люминофоры обеспечивают относительно высокую световую отдачу, но не обеспечивают хорошей цветопередачи; 3) *ортованадаты иттрия, активированные редкими землями* (европием, тербием, церием, неодимом, самарием и др.).

В ряде случаев оказывается целесообразным применять смеси из двух или нескольких люминофоров.

Перечень марок люминофоров, описание их свойств и

параметров приводятся в гл. 13 и 18, в которых рассматриваются принципы выбора люминофоров при конструировании различных групп газоразрядных ламп.

2.4. ГАЗЫ И ДРУГИЕ МАТЕРИАЛЫ

Различные газы широко используются в электроламповой промышленности. Их можно подразделить условно на три основные группы: 1) газы-наполнители; 2) технологические газы; 3) топливные газы.

Наибольшее значение при конструировании ламп имеют *газы-наполнители*, так как от выбора состава и давления наполняющей смеси решающим образом зависит качество источников света. Будучи введенными во внутреннее пространство лампы, газы-наполнители остаются там в течение всего времени ее работы, являясь как бы частью конструкции лампы. К этим газам относятся инертные газы — гелий, неон, аргон, криптон, ксенон, а также азот и их смеси. В гл. 6, 13 и 17 подробно излагаются вопросы, касающиеся назначения и роли наполняющего газа в различных источниках света, способов выбора состава и давления наполняющих газов и их смесей, а также методов и средств поглощения вредных примесей в наполняющей лампу среде.

Следует заметить, что не только инертные газы используются для наполнения ламп. Например, лампы-фотовспышки наполняются кислородом. Установлено, что наличие некоторого количества кислорода в галогенной лампе накаливания является необходимым условием ее нормальной работы (см. § 10.1).

К технологическим относят газы, применяемые для выполнения многих технологических процессов, не связанных, как правило, с огневой обработкой. Например, азот, а иногда также сухой воздух и аргон применяются для промывки ламп перед наполнением. Азот служит для создания защитной против окисления среды на некоторых технологических операциях. Водород используется для создания как защитной, так и восстановительной среды. Кислород поддерживает и усиливает пламя газовых горелок и используется для создания окислительной среды. Сернистый газ применяется для упрочнения стеклянных деталей ламп. По указанному признаку к технологическим газам относятся также ацетилен, бензол, углекислый газ и др.

Под *топливными* понимают горючие газы, с помощью которых производятся многочисленные операции в электроламповом производстве, связанные с температурной

огневой обработкой, например варка стекла, формовка изделий из стекла, заливка цоколей, сборка ножек, заварка ламп и др. К топливным газам относятся водород, метан, пропан, бутан, воздушный и смешанный генераторные газы, водяной газ и др.

Параметры топливных и технологических газов подробно описаны в общетехнической литературе. Знание их необходимо конструктору для того, чтобы оценить технологичность новых ламп с точки зрения возможностей указанных газов.

Внутриламповая среда — это не только инертные газы и их смеси. В формировании среды, окружающей тело накала лампы накаливания, большую роль играют вводимые в лампу газопоглощающие материалы (геттеры), которые необратимо поглощают или связывают избыточные или вредные пары и газы. К основным газопоглощающим материалам относятся красный фосфор, газовая сажа, углекислый барий, металлический цирконий, титан, алюминий. В § 6.4 описаны механизм работы газопоглотителей в лампах накаливания и методы выбора газопоглотителей для ламп, а в табл. 6.2 — основные параметры и свойства газопоглотителей. В ряде случаев газопоглотители применяются и в газоразрядных лампах для очистки от вредных газов и паров пространства, заключенного между горелкой и наружной колбой.

В основе работы галогенных ламп накаливания лежит протекающий в них галогенно-вольфрамовый цикл, препятствующий осаждению на колбе частиц вольфрама, испарившихся с тела накала. Для его осуществления в лампу вводят йод, или, чаще, химические соединения других галогенов, например бромистый метил и бромистый метилен (§ 10.1).

В колбы люминесцентных ламп низкого давления и в горелки подавляющего большинства газоразрядных ламп высокого давления вводят строго дозированное количество ртути. Ртуть вводят либо в жидком виде, либо в виде амальгам некоторых металлов (см. § 15.1). Пары ртути — главный компонент среды указанных ламп; электрический разряд в насыщенных парах ртути, отличающейся низким потенциалом ионизации по сравнению с инертными газами, — основа их функционирования.

Основным материалом, формирующим внутриламповую среду высокоэффективных натриевых ламп высокого давления, является натрий. В металлогалогенных газоразрядных лампах высокого давления (типа ДРИ) применяются йодиды натрия, таллия, индия и их смеси.

Некоторые перечисленные выше материалы, вводимые в лампу, относятся к числу основных, так как вместе с инертными газами обеспечивают нормальное протекание главнейших физических процессов в лампах, гарантирующих получение заданных параметров ламп.

Следует отметить также вспомогательные конструкционные материалы, которые не связаны непосредственно с задачей генерирования света. Это материалы для конструирования цоколя (холоднокатаная стальная лента для корпусов, латунный прокат для контактных пластин и др.), для конструктивно-технологического решения узла цоколь—колба (мраморный порошок, идитоловая мастика, асбест и др.), для маркировки и упаковки ламп и др.

Глава третья

ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДОЛОГИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

3.1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Приведенные выше классификация источников света, перечень основных параметров ламп, а также применяемых при разработке ламп конструкционных материалов дают представление об источниках света в целом как объекте конструирования. Легко заметить, что источники света имеют свои, присущие только им особенности; последние предопределяют некоторые особенности их конструирования:

1. Электрический источник света — это специфическое физическое устройство, преобразующее электрическую энергию в свет, поэтому при его конструировании нельзя механически, без критического анализа, пользоваться методами конструирования машин. Например, в машиностроении уже на стадии технического задания фигурирует понятие производительность машины. В случае источников света такого понятия в явном виде нет, оно косвенно воспроизводится совокупностью других параметров.

2. Несмотря на большое количество общих черт, объединяющих источники света, их конструирование ведется по трем, заметно отличающимся друг от друга методам, каждый из которых охватывает свой конструкторско-технологический класс (лампы накаливания, газоразрядные

лампы низкого давления, газоразрядные лампы высокого давления). Однако конструктор каждого направления должен быть максимально осведомлен о всем полезном, что имеется в смежных конструкторско-технологических направлениях и что может быть им использовано.

3. Обилие параметров, характеризующих источники света, сложность связей между ними, влияние на каждый из параметров многих факторов, лежащих в сферах физики, технологии, материалов, требует от конструктора активного использования в своей работе методов оптимизации, т. е. выбора наилучших решений на основе многовариантных расчетов и экспериментов (см. § 10.3).

4. При конструировании ламп приходится сталкиваться с существенными трудностями при расчете их параметров и конструктивных элементов. Вместе с тем относительно небольшие габариты и материалоемкость ламп, малая продолжительность технологических циклов их изготовления и наличие ускоренных методов испытания позволяют успешно создавать и исследовать макеты ламп. Широкое использование метода макетирования в ходе разработок новых источников света является важной особенностью проведения конструкторских работ в электроламповой промышленности.

5. Источники света, несмотря на их важную роль в освещении, являются все же комплектующими изделиями для осветительных приборов. Поэтому уже в техническом задании на создание нового источника света должен быть определен тип осветительного прибора, для которого создается лампа и учтены ограничения, которые накладывает на параметры и конструкцию лампы этот прибор. И на всех последующих стадиях разработки конструктор лампы и конструктор осветительного прибора должны работать в тесном контакте.

3.2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКАМ СВЕТА

Состав общих требований к источникам света ставит целью обеспечить высокие эффективность и качество изделий и включает в себя следующее: 1) новизну и прогрессивность параметров и конструкции, 2) соответствие типажу, 3) минимальные массу и материалоемкость, 4) технологичность конструкции, 5) высокие художественно-эстетические качества, 6) безопасность, 7) конкурентоспособность. Эти требования нельзя считать раз и навсегда заданными и исчерпывающими. Они постепенно уточняются и углубляются с учетом уровня техники и требований

жизни. Следует отметить, что, будучи обязательными для выполнения при проведении ОКР, перечисленные общие требования всегда являются для конструкторов надежным руководством и ориентиром в работе по созданию новых источников света.

Новизна и прогрессивность параметров и конструкций. Это требование к источнику света обеспечивается как на стадии проведения научно-исследовательской работы, так и в ходе опытно-конструкторской работы. Для создания источника света, удовлетворяющего этому требованию, необходимо прежде всего учитывать имеющиеся лучшие отечественные и зарубежные достижения по соответствующей группе источников света, конструкционным материалам, технологическим процессам, технологическому оборудованию и обогащать их данными новых исследований и конструкторских проработок.

О новизне и прогрессивности источника света позволяет судить принятая в нашей стране система периодической *аттестации* продукции, согласно которой каждый новый и выпускаемый источник света в результате аттестации относится к одной из трех категорий качества. Лампы *высшей* категории качества должны по технико-экономическим показателям соответствовать лучшим отечественным и мировым достижениям или превосходить их, быть конкурентоспособными на внешнем рынке, иметь повышенные стабильные показатели качества, соответствовать ГОСТ (ТУ), учитывающим требования международных стандартов, обеспечивать получение экономического эффекта и удовлетворять потребности народного хозяйства и населения страны. Источникам света, отнесенным к высшей категории качества, обычно присваивается государственный Знак качества, изображение которого наносится на лампу или тару, в которую лампы упаковываются. Лампы *первой* категории качества по технико-экономическим показателям должны соответствовать современным требованиям ГОСТ (ТУ) и удовлетворять потребности народного хозяйства и населения страны. К источникам света *второй* категории качества относятся те, которые по технико-экономическим показателям не соответствуют современным требованиям народного хозяйства и населения страны, морально устарели и подлежат модернизации или снятию с производства.

Если в ходе создания нового источника света были сделаны относящиеся к нему открытия или изобретения, соответствующим образом защищенные, а также если по-

лучено авторское свидетельство на промышленный образец (новое промышленное решение изделия) или товарный знак (оригинально оформленный рисунок, лаконично характеризующий продукцию и специфику предприятия), то это подтверждает новизну и прогрессивность разработанного источника света.

Несмотря на большое количество параметров, характеризующих источник света (см. § 1.2), при оценке его новизны и прогрессивности в большинстве случаев прежде всего обращают внимание на экономичность (световую отдачу), долговечность (срок службы) и надежность (наработка на отказ и вероятность безотказной работы).

Соответствие типажу. Под типажом понимается технически и экономически обоснованная совокупность типоразмеров источников света, объединенных общностью назначения и обладающих прогрессивными техническими показателями. Типаж, в котором разработка отдельных типоразмеров конкретизирована сроками и исполнителями, является по существу научно обоснованной перспективной (долгосрочной) программой разработок источников света. В связи с этим естественным является требование к конструктуру, чтобы, как правило, каждая новая разработка велась на основе предусмотренной типажом программы работ и чтобы каждый созданный источник света соответствовал типажу.

Типаж позволяет принимать единые конструкторские решения, обеспечивает *унификацию* узлов и изделий, дает возможность использовать общие методы расчета и конструирования, играет большую организующую роль в работе по созданию новых источников света. Однако несмотря на большое значение типажа конструктор должен помнить, что типаж — это не догма. Утвержденный типаж совершенствуется по мере развития научно-технической базы источников света, он может быть заменен другим типажом на основе более прогрессивной базовой модели.

Минимальная масса и материалоемкость. Казалось бы, что эти требования в связи с относительно небольшими размерами источников света не являются существенными. Однако это не так. Нужно учитывать, во-первых, что они выпускаются в огромных количествах, являются изделиями массового производства. Во-вторых, для изготовления источников света применяется ряд весьма дефицитных материалов (вольфрам и молибден, никель и медь, дорогостоящие газы — криптон и ксенон, кварц и специальные стекла с добавкой свинца и др.).

Важнейшим резервом снижения массы и материалоемкости ламп является уменьшение их размеров. С теоретической точки зрения он в ряде случаев еще не исчерпан. Однако практическая реализация наталкивается на существенные конструктивные и технологические трудности.

Технологичность конструкции. Под технологичностью конструкции источника света понимается степень его приспособленности (и входящих в него деталей и узлов) к изготовлению с наименьшими трудовыми затратами при рациональном расходовании материала. Для обеспечения технологичности конструктор должен хорошо представлять технологию изготовления и сборки деталей, узлов и самой лампы, работать в тесном контакте с технологами и разработчиками технологического оборудования.

Технологичность источника света резко повышается при использовании в его конструкции стандартизованных, нормализованных и унифицированных деталей и узлов. Стандартизовать деталь, узел — это значит привести их размер, форму и конструкцию в соответствие с требованиями какого-либо ГОСТ. Под нормализацией понимают принятое ограничение в использовании ряда стандартизованных размеров, форм и конструкций деталей и узлов. Унификация — это повторение в конструкциях данной группы источников света одних и тех же деталей и узлов.

Технологичность источника света зависит не только от его конструкции, но и от уровня технологии и организации производства. Чтобы это влияние не было отрицательным, необходимо разработку источников света вести параллельно (одновременно) с разработкой соответствующей технологии, технологического оборудования и методов организации производства.

Для определения степени отработанности конструкции ламп на технологичность разработан комплекс показателей, который приведен в ОСТ 160.686.826-80. К показателям технологичности ламп и стартеров относятся:

удельная трудоемкость ($T_и$), равная отношению общей трудоемкости изготовления изделия к номинальному значению его основного параметра (для ламп — номинальное значение световой отдачи, а когда она не нормируется, то средняя продолжительность горения; для стартеров — число зажиганий ламп);

коэффициент использования материалов ($K_{и,м}$), равный отношению массы детали к массе материала, планируемого на изготовление этой детали;

выход годных изделий ($B_г$), равный отношению коли-

чества ламп, сданных на склад готовой продукции, к количеству колб, поступивших на операцию заварки ламп;

удельная технологическая себестоимость ($C_т$), включающая стоимость сырья и материалов, заработную плату, отчисления на социальное страхование, расходы на содержание оборудования, на топливо и энергию, цеховые расходы, стоимость покупных полуфабрикатов, отнесенные к единице основного параметра изделия.

В ОСТ 160.686.826-80 указываются численные значения показателей технологичности для каждого типа ламп массового или крупносерийного производства, которые обязательны для выполнения при разработке ламп.

Высокие художественно-эстетические качества. Эти требования в полной мере относятся лишь к тем источникам света, которые работают открыто и не защищены элементами осветительного прибора от глаз (лампы-светильники, свечеобразные лампы в некоторых бытовых светильниках, цветные и декоративные и т. п.). Конечно, и другие лампы, особенно реализуемые в розничной торговле, должны иметь достаточно красивое оформление, что производит благоприятное психологическое воздействие на покупателя. Например, большое значение имеет высокое художественно-эстетическое качество индивидуальной упаковки ламп, а также их маркировки.

Красивый внешний вид источника света может быть достигнут при использовании в ходе конструирования определенных художественных принципов или так называемых эстетических элементов (симметрия, ритм, членение, пропорциональность, композиция и др.). Разумное применение этих элементов в каждой разработке может быть достигнуто при участии художников-конструкторов (дизайнеров). Общие представления о художественном конструировании необходимы и для конструкторов источников света.

Безопасность. Обеспечение безопасности любых изделий, в том числе и источников света, имеет большое социальное значение. Потенциально источники света содержат в себе следующие виды опасности: электроопасность (при несогласованности размеров цоколя с размером патрона, при коротком замыкании электродов в случае отделения цоколя от колбы), опасность поражения осколками стекла (при разбивании ламп, при разрушении колб вследствие развития электрического разряда в лампе), загрязнение окружающей среды ртутными парами (при неаккуратной утилизации ртутных газоразрядных ламп), пожароопасность (при высокой температуре на колбе и цоколе, при разного рода коротких замыканиях, сопровождающихся разбрызгиванием расплавленного металла на окружающие лампу горючие предметы).

Конструктор имеет все возможности для того, чтобы предотвратить проявление этих потенциальных опасностей. В последующих главах настоящего учебника описаны способы обеспечения электрической прочности деталей, узлов и ламп в целом; изложен расчет плавких предохранителей, предотвращающих развитие электрического разряда в лампах накаливания; приведены методы расчета размеров и прочности колб источников света; описаны способы повышения прочности соединения цоколя с колбой; показана перспективность замены жидкой ртути в люминесцентных лампах амальгамами и др.

Конкурентоспособность. Под конкурентоспособностью источников света следует понимать совокупность показателей, необходимых и достаточных для обеспечения поставки их на внешний рынок. Главными показателями в этой совокупности являются высокий технико-экономический уровень изделий, новизна и прогрессивность параметров и конструкций. Однако этого недостаточно. Конкурентоспособность может быть поддержана качеством внешней отделки и оформлением упаковки, удобством эксплуатации, рекламными мероприятиями и др. Источник света, чтобы быть конкурентоспособным, должен обладать патентоспособностью и патентной чистотой. Патентоспособность — совокупность признаков технического решения, отличающегося новизной, необходимых и достаточных для признания его изобретением. Патентная чистота — это юридический термин, применяемый к изделиям (конструкциям), не содержащим элементов, запатентованных в стране, где предполагается продавать изделия.

Обобщающим показателем при оценке вновь созданного или модернизированного источника света может служить стоимость единицы световой энергии (одного люмен-часа), вырабатываемой данным источником, а также косвенно стоимость люмен-часа, вырабатываемого осветительной установкой, укомплектованной этими источниками света [2]. Как правило, этот показатель должен быть ниже, чем у соответствующих аналогов.

Таковы общие требования к источникам света, которыми надлежит руководствоваться на всех стадиях создания и совершенствования источников света.

3.3. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ РАЗРАБОТКУ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Кроме указанных в § 3.1 и 3.2 требований, процесс создания источников света регламентируется рядом нормативно-технических документов общесоюзного и ведомственного значения, а также рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Среди них следует выделить отраслевые стандарты Минэлектротехпрома (ОСТ 160.690.004-81 — ОСТ 160.690.004.04-81 «Разработка и постановка на производство электротехнических изделий». Согласно этим стандартам процесс создания нового источника света состоит из следующих крупных этапов: 1) научно-исследовательская работа (НИР), 2) опытно-конструкторская работа (ОКР), 3) освоение промышленного производства. По аналогичной схеме осуществляется и модернизация, под которой понимают приведение источника света в соответствие с современными требованиями путем внесения в него относительно незначительных изменений.

На всех стадиях создания и освоения производства источников света проводятся патентные исследования. Их содержание, порядок проведения и форма отчета излагаются в «Методических указаниях (ЗП-2-78)», утвержденных в 1978 г. Патентные исследования включают следующие виды работ: разработку регламента поиска (определение предмета поиска, стран и фирм, глубины и методов поиска и др.); поиск и отбор патентной и другой научно-технической документации; систематизацию и анализ отобранной документации; обобщение результатов и составление отчета. Отчет о патентных исследованиях входит в состав обязательных документов, без которых не могут быть приняты НИР и ОКР как в полном объеме, так и на отдельных стадиях их выполнения. Он является основой для составления карты технического уровня и качества изделий, патентного формуляра, заключения о новизне технического решения, патентного паспорта (необходимого для патентования изобретения за границей), лицензионного паспорта (необходимого при продаже лицензии за границей).

Научно-исследовательская работа проводится обычно с целью решить какую-либо новую светотехническую задачу.

В ходе НИР обосновывается необходимость создания нового или модернизации существующего источника света, устанавливаются необходимые значения новых параметров,

определяется тип светового прибора, в котором источник света целесообразно использовать. При этом учитываются данные научного прогнозирования. Результатом НИР в большинстве случаев является проект технического задания (ТЗ) на проведение ОКР, которое должно содержать все исходные данные, необходимые для конструирования лампы. Техническое задание является одновременно заключительным этапом НИР и начальным этапом ОКР.

Научно-исследовательская работа в области источников света должна проводиться в следующей последовательности: а) разработка, согласование и утверждение ТЗ на НИР; б) проведение теоретических и экспериментальных исследований; в) разработка, изготовление и испытание макетов (если это предусмотрено техническим заданием); г) оформление в установленном порядке документации по защите изобретений, сделанных при проведении НИР; разработка предложений по реализации результатов работы; составление проекта технического задания на ОКР (если проведение ОКР предусматривается); составление патентного формуляра и научного отчета; д) приемка выполненной НИР (порядок приемки устанавливается в ТЗ).

Опытно-конструкторская работа — главный этап создания источника света. Задача ОКР заключается в том, чтобы разработать конструкцию лампы, т. е. окончательно определить, описать в документации и воспроизвести в опытных образцах ее инженерно-техническое решение. Причем конструкция лампы и ее образцы должны полностью отвечать требованиям ТЗ. Созданная в ходе ОКР конструкторская документация должна позволить изготовить источник света с заданными параметрами при соблюдении всех требований электроламповой (электровакуумной) технологии.

Опытно-конструкторская работа по источникам света включает в себя следующие этапы: а) разработка, согласование и утверждение ТЗ на ОКР; б) разработка и утверждение технического предложения; в) разработка, согласование и утверждение эскизного проекта; г) разработка, согласование и утверждение технического проекта; д) разработка, согласование и утверждение рабочей документации; разработка технологии изготовления источника света применительно к современному технологическому оборудованию; проектирование и изготовление (при необходимости) технологического оборудования и оснастки, контрольно-измерительного и испытательного оборудования; изготовление и предварительное испытание опытных

образцов ламп; корректировка конструкторской и технологической документации по результатам изготовления и испытания опытных образцов; разработка проекта технических условий или отраслевого стандарта на лампы; изготовление (при необходимости) и испытание партии изделий по откорректированной конструкторской и технологической документации, в том числе для предъявления к приемке; доработка проекта технических условий или отраслевого стандарта на лампы; составление технического отчета о выполнении ОКР; предъявление ОКР к приемке; е) испытание опытных образцов или партии ламп и приемка ОКР ведомственной или межведомственной комиссией (МВК); передача документации предприятию-изготовителю для промышленного производства.

Освоение промышленного производства является заключительным этапом создания источника света. Оно осуществляется в две стадии: а) изготовление, испытания и приемка установочной серии; корректировка документации по результатам приемки; б) проверка и корректировка документации по оснащенному и зафиксированному в документации технологическому процессу.

При создании источников света обязательным требованием является непрерывность работ — от исследований до освоения промышленного производства, что обеспечивает сокращение сроков разработки. Это требование нашло свое отражение в описанной выше схеме.

Большое значение для повышения качества разрабатываемых и выпускаемых источников света имеет ОСТ 160.820.004-80 «Аттестация промышленной продукции. Порядок проведения аттестации по трем категориям качества в Министерстве электротехнической промышленности», предусматривающий обязательную аттестацию вновь созданных, модернизированных и выпускаемых предприятиями источников света. Об основном принципе аттестации источников света уже упоминалось в § 3.2. На основе результатов аттестации осуществляются: планирование объемов производства по категориям качества, оценка деятельности предприятий по повышению технического уровня и качества продукции, экономическое стимулирование преимущественного производства продукции с государственным Знаком качества.

Следует указать также еще на нормативный документ Минэлектротехпрома, требующий проведения функционально-стоимостного анализа (ФСА) источников света на стадиях их разработки и производства. Главная задача

ФСА — выявить и исключить те функции изделия, которые оно может выполнить, хотя их выполнение от него не требуется, и тем самым упростить и удешевить изделие. Такой анализ является многофакторным и сложным, требующим участия конструкторов, технологов, экономистов.

При разработке источников света конструктор должен учитывать соответствующие рекомендации Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ), Международной организации по стандартизации (ИСО), Международной электротехнической комиссии (МЭК).

3.4. ЕДИНАЯ СИСТЕМА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ (ЕСКД)

При разработке изделий, в том числе и источников света, большое значение имеет правильное и единообразное выполнение конструкторской документации. Этого можно достигнуть на основе знания и неукоснительного соблюдения требований Единой системы конструкторской документации (ЕСКД), обеспечивающей одинаковое понимание документации на различных предприятиях страны и, следовательно, возможность изготовления изделий на одном предприятии по технической документации другого без какой-либо дополнительной переработки.

Единая система конструкторской документации состоит из следующих главных частей: 1) основные положения, 2) обозначения конструкторских документов; 3) правила выполнения текстовых документов; 4) правила выполнения чертежей; 5) правила выполнения схем и условных графических обозначений на них; 6) правила выполнения чертежей однотипных предметов производства; 7) правила внесения изменений, учета и хранения конструкторской документации; 8) правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации.

Каждая из этих частей содержит несколько стандартов, которые постоянно уточняются, что необходимо учитывать при составлении конструкторской документации.

Внедрение ЕСКД дает ряд положительных результатов: сокращается объем документов; упрощается оформление чертежей, схем и др.; сокращается время поиска документов; появляется возможность использовать средства вычислительной техники при обработке содержащейся в документации информации; улучшается сопроводительная документация, направляемая потребителю; совершенствуются учет, хранение и дублирование конструкторской докумен-

тации; облегчается международный обмен технической документацией; обеспечивается возможность использовать современные методы изготовления и размножения конструкторской документации.

Глава четвертая

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ

4.1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА ОКР

В § 3.3 приведен перечень основных этапов ОКР, первым из которых является разработка, согласование и утверждение ТЗ.

Техническое задание на ОКР является первичным основополагающим проектным документом, содержащим все исходные данные, необходимые для разработки или модернизации изделия. Этим обязательным для исполнения документом руководствуются конструкторы на всех последующих стадиях проведения ОКР.

Техническое задание содержит следующие основные сведения:

1) цель и назначение ОКР (создание нового источника света на новых принципах, замена морально устаревшего изделия, выполнение специального заказа и др.); ориентировочная потребность в разрабатываемом изделии; каким документом поручено проведение работы;

2) технические требования к новому источнику света (перечень параметров и их значений; сравнительная оценка технического уровня изделия; задание по уровню стандартизации и унификации; указания по принципиальному устройству, исходя из специфических требований к изделию; особые условия эксплуатации; ориентировочная цена и др.);

3) состав технической документации, разрабатываемой в ходе проведения ОКР (зависит от того, какие виды проектов — эскизный, технический и др. — предусмотрены в ТЗ);

4) чем заканчивается ОКР и какие материалы предъявляются комиссии, принимающей ОКР (обычно ОКР должна заканчиваться: решением об утверждении акта приемки ОКР, утверждением технических условий или отраслевого стандарта на промышленное производство, актом передачи технической документации предприятию-изготовителю).

Кроме указанных основных данных, характеризующих техническое содержание ОКР, в ТЗ приводится также ряд других важных сведений: перечень этапов ОКР, сроки выполнения этапов и работы в целом, названия организаций-исполнителя и соисполнителей, название предприятия-изготовителя опытных образцов и изделий промышленного производства, сроки и объем выпуска установочной партии, ориентировочные сроки начала промышленного производства, источники финансирования и другие данные.

Техническое задание разрабатывается на основании *технических требований* заказчика. Слово «заказчик» имеет широкий смысл — это любая организация (институт, предприятие, ведомство и т. п.), заинтересованная в данной разработке, заказавшая и финансирующая ее.

Кроме технических требований заказчика при разработке ТЗ учитывается многое другое: результаты предшествовавшей НИР (если она проводилась); параметрические и размерные ряды, установленные соответствующими стандартами; результаты анализа технического уровня отечественной и зарубежной техники в данной области; действующая нормативно-техническая документация; международные рекомендации по стандартизации; результаты проведения патентно-информационных исследований.

Разработке ТЗ как на ОКР, так и на НИР всегда должно уделяться особое внимание. Хорошо разработанное ТЗ во многом определяет технико-экономический уровень разработки, уровень технической подготовки производства новых изделий, сроки проведения НИР, ОКР и освоения промышленного изготовления изделий, стоимость разработки и подготовки производства.

Ответственность за разработку ТЗ несет та организация, которой поручено проведение ОКР. Учитывая важность документа, к работе над ним обычно привлекают организации и специалистов разного профиля.

4.2. ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ. ЭСКИЗНЫЙ И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТЫ

Следующими за ТЗ этапами ОКР являются, как было указано в § 3.3, разработка и утверждение технического предложения; разработка, согласование и утверждение эскизного проекта и технического проекта. Вопрос о том, все ли эти этапы должны выполняться в ходе ОКР или нет, решается в зависимости от степени сложности изделия, уровня предварительной проработки вопроса, личного опыта конструктора и других обстоятельств. При разработке источников света нередко применяется одностадийное проектирование, когда вслед за ТЗ сразу выполняют рабочий проект, минуя техническое предложение, эскизный и технический проекты. Решение о стадийности проведения ОКР оговаривается в ТЗ на ОКР.

Техническое предложение, эскизный проект и технический проект отличаются друг от друга целями, глубиной проработки и документальным составом проекта.

Техническое предложение — это совокупность документов, составленных на основе утвержденного ТЗ и отражающих техническое направление, принятое конструкторами-разработчиками при разработке изделия.

На этапе разработки технического предложения проводятся многовариантные экспериментальные и расчетные исследования, макетирование и испытания макетов ламп и др. Главной задачей на этом этапе ОКР является рассмотрение вариантов возможных конструктивных решений лампы, выбор и обоснование оптимального варианта, позволяющего обеспечить требования ТЗ. Уже на этом этапе проводится предварительная проработка вопросов технологичности изделия. В завершенном техническом предложении на разработку источника света должны содержаться: обоснованное предложение по принципиальному устройству изделия; технико-экономическая оценка целесообразности принимаемых технических решений, в том числе по применению новых материалов и комплектующих изделий; уточненные данные об экономической эффективности и перспективности изделия; оценка целесообразности принятой в ТЗ стадийности разработки; при необходимости обоснованные предложения по уточнению ТЗ и др.

В комплект документации технического предложения входят: 1) ведомость технического предложения, составленная по ГОСТ 2.106-68; 2) предварительный расчет технико-экономической эффективности; 3) пояснительная записка с выводами, подробно излагающая работу, проделанную на этапе разработки технического предложения, и составленная по ГОСТ 2.106-68; 4) копия ТЗ.

Эскизный проект — комплекс конструкторских документов, дающих общее представление о принципе работы, устройстве, основных параметрах и назначении изделия. Эскизный проект разрабатывается на основе требований ТЗ и конструктивных решений, принятых в техническом предложении. Основные положения эскизного проекта, как правило, должны проверяться на макетах.

При разработке источников света в состав конструкторских документов эскизного проекта включают: 1) ведомость эскизного проекта, составленную по ГОСТ 2.106-68; 2) эскизные чертежи общего вида источника света и основных его узлов (тело накала, катоды, ножка, колба, цоколь и др.); 3) пояснительную записку по ГОСТ 2.106-68, содержащую: обоснование технических решений, принятых на стадии разработки эскизного проекта, с необходимыми чертежами; предварительный расчет уровня стандартизации и унификации; примерные значения всех параметров (см. § 1.2) и их соответствие ТЗ; оценку технологичности; результаты исследования макетов; данные о необходимых новых комплектующих изделиях и материалах и др.; 4) расчеты (конструктивные, светотехнические, электротехнические, прочностные и др.); 5) предварительный расчет технико-экономической эффективности от внедрения разрабатываемых изделий в производство и от их эксплуатации; 6) копия ТЗ.

Технический проект разрабатывается на основе ТЗ и утвержденного эскизного проекта. На стадии разработки технического проекта принимаются окончательные технические решения по вопросам, рассмотренным в эскизном проекте, и все конструктивные решения разрабатываются полностью; отрабатывается конструкция изделия на технологичность согласно ОСТ 160.686-76; изготавливаются и испытываются экспериментальные образцы; уточняются предприятия-изготовители разрабатываемого изделия и объем выпуска на первые три года промышленного производства; определяются предприятия-изготовители новых комплектующих изделий и материалов. Завершенный технический проект представляет собой комплект конструкторской документации, дающий полное и окончательное представление о разрабатываемом изделии и все необходимые данные для разработки рабочей документации.

В комплект документации технического проекта на разработку источников света входят: 1) ведомость технического проекта, составленная по ГОСТ 2.106-68; 2) чертежи общего вида источников света и основных его узлов; 3) пояснительная записка по ГОСТ 2.106-68, содержащая: окончательные технические решения, принятые и проверенные на стадии разработки технического проекта, с необходимыми чертежами; уточненный расчет уровня стандартизации и унификации; значения всех параметров (§ 1.2), исчерпывающе характеризующих новый источник света, и их соответствие ТЗ; оценку технологичности; результаты испытания экспериментальных образцов; промышленно-эстетическую характеристику; сведения об изобретениях, сделанных или использованных при разработке; оценку конкурентоспособности; обоснование выбора дефицитных материалов; намеченные сроки освоения изделия, предприятия-изготовители, объем выпуска установочной серии и первых трех лет промышленного производства; ориентировочный расчет цены изделия и ее отклонение от принятой в ТЗ и др.; 4) уточненные расчеты (конструктивные, светотехнические, электротехнические, прочностные и др.); 5) расчет технико-экономической эффективности от внедрения в производство и от эксплуатации; 6) документы, подтверждающие патентоспособность и патентную чистоту; 7) предварительная ведомость покупных изделий и ведомость согласования их применения, составленные соответственно по ГОСТ 2.106-68 и ГОСТ 2.117-71; 8) технические требования к новым комплектующим изделиям и материалам, а также решения по их освоению; 9) проектная технологическая документация по ГОСТ 3.1102-74, в том числе перечень специального технологического оборудования, подлежащего разработке для обеспечения серийного производства изделия; 10) проект ТУ на опытный образец или опытную партию; 11) копия ТЗ.

4.3. РАБОЧИЙ ПРОЕКТ

Утвержденный технический проект служит основанием для перехода к следующей стадии ОКР — *рабочему проекту*, предусматривающему разработку, согласование и утверждение рабочей документации.

На стадии рабочего проекта осуществляется полная детализация конструкции изделия путем разработки чертежей на каждую деталь, входящую в него и подлежащую изготовлению. При этом согласно ОСТ 160.686 350-76 особо отрабатывается конструкция изделия на технологичность. Документация рабочего проекта должна быть достаточной для того, чтобы изготовить опытные образцы или опытные партии изделий на конкретном предприятии-изготовителе в полном соответствии с требованиями ТЗ.

При разработке источников света в состав рабочего проекта входит следующая основная документация: 1) конструкторская рабочая документация опытного образца или опытной партии источников света по номенклатуре согласно ГОСТ 2.102-68; 2) ТУ предприятия-разработчика на опытные образцы или опытную партию, а также проект ТУ или отраслевого стандарта на изделия, намеченные к промышленному производству; 3) ведомости согласования применения покупных изделий и допустимых замен материалов и комплектующих изделий; 4) согласованные и утвержденные ТУ на новые комплектующие изделия и материалы, необходимость в которых возникла при выполнении ОКР; 5) проект норм расхода материалов и комплектующих изделий; 6) полный расчет технико-экономической эффективности от внедрения в производство и эксплуатацию нового изделия; 7) документы, подтверждающие патентоспособность и патентную чистоту изделия; 8) информационная документация на изделие; 9) документ о техническом уровне и качестве изделия, необходимый для аттестации качества; 10) рабочая технологическая документация на изделия промышленного производства согласно номенклатуре ГОСТ 3.1102-74, а также рабочая документация на технологическую оснастку и специальное технологическое оборудование, необходимое для промышленного производства нового изделия.

На всех стадиях ОКР очень важно поддерживать тесную связь с предприятием-изготовителем нового изделия, подробно информировать его о ходе работ. Особенно это необходимо на стадии разработки рабочего проекта, когда на первый план выдвигается подготовка производства изделий. Такая связь помогает повысить технологичность изделия, использовать в разработке и при производстве имеющиеся на предприятии детали, оснастку, средства контроля, нестандартное оборудование и тем самым ускорить и облегчить процесс освоения новых изделий.

По документации рабочего проекта организация-разработчик, или под его авторским надзором — предприятие-изготовитель изготавливает опытные образцы изделий. При разработке источников света в большинстве случаев изготавливается опытная партия, которая подвергается предварительным испытаниям на соответствие ТУ на опытную партию. По результатам этих испытаний организация-разработчик при необходимости производит корректировку рабочей документации

и в зависимости от вида производства присваивает ей литеру «О» (для документации изделий, предназначенных для массового и серийного производства) или литеру «И» (для изделий индивидуального производства). После этого организация-разработчик составляет отчет о проведении ОКР, подготавливает всю необходимую документацию, подтверждающую завершение ОКР с положительными результатами, и предъявляет ее специальной комиссии, создаваемой для приемки ОКР.

4.4. ПРИЕМКА ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКОЙ РАБОТЫ

Оценку результатов ОКР осуществляют обычно ведомственные (ВК) или межведомственные (МВК) комиссии, создаваемые из специалистов нескольких организаций. Главная задача комиссии (назовем ее для краткости МВК) состоит в том, чтобы установить, во-первых, соответствует ли разработанное изделие утвержденному ТЗ, и, во-вторых, достаточен ли объем конструкторско-технологической документации для организации производства изделия на данном промышленном предприятии; МВК решает также и ряд других задач, например, оценивает степень соответствия разработки современному уровню техники и ее конкурентоспособность; высказывает мнение о том, к какой категории качества новая разработка может быть отнесена; согласовывает проект ТУ или отраслевой стандарт на изделие промышленного производства; дает рекомендации по освоению разработанных изделий в производстве и др. Чтобы решить эти задачи, МВК тщательно анализирует полноту и качество предъявленной конструкторско-технологической документации, устанавливает ее достоверность, при необходимости проводит межведомственные испытания предъявленных образцов или партии новых изделий, проверяет наличие технологического и испытательного оборудования и др. В заключение МВК составляет акт приемки ОКР или протокол о непринятии ее с указанием причин. Если МВК работу приняла, акт о приемке ОКР составлен и соответствующим образом утвержден, то организация-разработчик после корректировки документации по замечаниям МВК и присвоения ей литеры «O_1» передает полный комплект рабочей документации предприятию-изготовителю для подготовки промышленного производства новых изделий. Передаваемая документация обязательно содержит полный комплект конструкторской документации, утвержденный в установленном порядке, ТУ или отраслевой стандарт, рабочую технологическую документацию на изделия промышленного производства и многие другие расчетные, конструкторские и технологические документы, созданные на стадиях разработки технического предложения, эскизного, технического и, главным образом, рабочего проекта.

На этом официально заканчивается ОКР. Однако конструкторам-разработчикам и после этого предстоит многое сделать по оказанию

помощи предприятию-изготовителю при подготовке и выпуске установочной партии, организации промышленного производства новых изделий, осуществлении авторского надзора, по крайней мере в первые месяцы промышленного выпуска изделий.

Анализируя содержание ОКР, легко заметить, что она включает в себя не только проведение исследований, экспериментов, расчетов и конструкторских проработок (этим вопросам будут посвящены три следующих раздела учебника), но и большую организаторскую работу, направленную на обеспечение системного подхода к работе, создание духа коллективизма, укрепление и развитие творческих связей с предприятиями, исследовательскими и конструкторскими организациями, на обеспечение четкого соблюдения установленного различными положениями и инструкциями порядка взаимодействия людей и организаций в ходе создания новых изделий.

4.5. УСТАНОВОЧНАЯ СЕРИЯ И НАЧАЛО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НОВОГО ИЗДЕЛИЯ

Под *установочной серией* новых изделий понимают первую партию изделий, изготовленную на технологической оснастке, предназначенной для промышленного производства (т. е. для установившегося процесса непрерывного выпуска изделий). Изделия, выпускаемые в указанных условиях установившегося непрерывного производства, называют изделиями *серийного* производства. Если какие-то изделия серийного производства выпускаются в весьма значительных объемах на ряде предприятий и имеют широкий круг потребителей, то их называют изделиями *массового* производства. К последним относится бо́льшая часть источников света.

Подготовка производства и изготовление установочной серии изделий — задачи предприятия-изготовителя, принявшего от организации-разработчика необходимую рабочую конструкторско-технологическую документацию. Объем и сроки выпуска установочной серии определяются ТЗ на ОКР или МВК при приемке ОКР. После изготовления установочной серии она представляется для приемки МВК, которая работает в таком же порядке, как и при приемке ОКР, однако акцентирует свое внимание прежде всего на технологических вопросах.

Межведомственная комиссия проводит испытания установочной серии, целью которой является проверка технологической подготовленности предприятия, наличия и состояния технологического, испытательного оборудования и оснастки, проверка конструкторской и технологической документации, качества изделий установочной серии и соответствия их требованиям ТУ, оценка уровня производственного брака, достаточности мероприятий по обеспечению дальнейшего серийного выпуска изделий и др.

Если установочная партия принята МВК и акт комиссии утвержден, то предприятие-изготовитель, которое в большинстве случаев является держателем подлинников конструкторско-технологической документации, приступает к подготовке промышленного производства изделий. Комплексно отрабатываются технологические процессы на все виды работ — от поступления на предприятие материалов и комплектующих изделий до отгрузки готовой продукции. Отработанный технологический процесс утверждается предприятием-изготовителем и становится обязательным. Новые изделия изготавливаются по утвержденному и полностью оснащенному технологическому процессу. При этом в производстве проверяется, окончательно отрабатывается и в установленном порядке корректируется подлинник полного комплекта рабочей документации, которому затем присваивается литера «Б», изделие считается освоенным в промышленном производстве, а работа по созданию нового источника света полностью законченной.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Глава пятая

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАМПАХ НАКАЛИВАНИЯ

5.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Всякие тела, имеющие температуру выше абсолютного нуля, способны к *тепловому излучению*. Оно представляет собой электромагнитное излучение, характеризующееся длиной λ и частотой ν электромагнитных волн и возникающее в результате теплового возбуждения частиц (атомов, молекул, ионов и пр.), входящих в состав излучающего тела.

Тепловое излучение несет с собой энергию излучения. Мощность энергии излучения (поток излучения) и спектральный состав излучения данного тела определяются его тепловым состоянием, т. е. температурой. При невысоких температурах тела мы имеем дело преимущественно с инфракрасным излучением. При увеличении температуры до определенных значений увеличивается излучение в видимой области спектра ($\lambda=380\div770$ нм) и оно начинает восприниматься как свет.

В основе работы всех тепловых источников света, в том числе и ламп накаливания, лежат законы теплового излучения. Они достоверно установлены для так называемого абсолютно черного тела (далее — *черное тело*), под которым понимают тело, поглощающее всю падающую на него энергию. Коэффициент поглощения (отношение поглощаемой телом энергии к падающей на него) черного тела $\alpha=1$. В природе таких тел нет (наибольший коэффициент поглощения имеет черный бархат $\alpha=0{,}995\div0{,}996$), но можно легко создать близкую к нему модель и еще легче представить такой идеальный поглотитель (полный излучатель). Поскольку законы теплового излучения черного тела подробно описаны в учебниках физики, то ниже приводятся лишь формулировки, характеризующие их сущность.

Закон Кирхгофа (1859 г.). При температуре T энергетическая светимость[1] M_{eT} данного реального тела (общее количество энергии, излучаемое телом с единицы поверхности в единицу времени) равна произведению коэффициента поглощения его α_T на энергетическую

[1] Прежнее название энергетической светимости — «плотность излучения».

светимость черного тела M_{esT}, т. е.

$$M_{eT}=\alpha_T M_{esT}. \qquad (5.1)$$

Закон Стефана — Больцмана (1879 г., 1884 г.). Энергетическая светимость черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$M_{esT}=\sigma_0 T^4, \qquad (5.2)$$

где постоянная Стефана — Больцмана $\sigma_0=5{,}67\cdot10^{-8}$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$. Это закон интегрального излучения черного тела.

Закон Вина (1894 г.). Произведение длины волны λ_{max}, соответствующей максимуму спектральной плотности энергетической светимости[1] черного тела, на его абсолютную температуру T есть величина постоянная:

$$\lambda_{max}T=C', \qquad (5.3)$$

где $C'=2896\cdot10^3$ нм·К. Из (5.3) видно, что при повышении температуры черного тела максимум его спектральной плотности энергетической светимости смещается в сторону более коротких волн. Поэтому этот закон называется законом смещения Вина.

Вин установил также закон распределения спектральной плотности энергетической светимости черного тела (1896 г.). Затем это сделали Релей и Джинс (соответственно в 1900 и 1906 гг.).

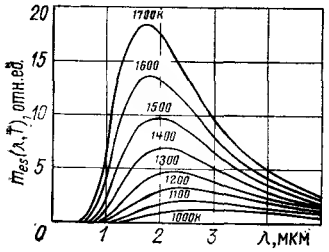
Закон Планка (1900 г.). Это закон спектрального распределения энергии черного тела:

$$m_{\lambda S}(\lambda, T)=C_1\lambda^{-5}\left(e^{C_2/\lambda T}-1\right)^{-1}, \qquad (5.4)$$

где $m_{es}(\lambda, T)$ — спектральная плотность энергетической светимости черного тела для длины волны λ при абсолютной температуре T; C_1 и C_2 — постоянные ($C_1=2\pi hc^2=3{,}741\cdot10^{-16}$ Вт·м^2; $C_2=hc/k=1{,}439\cdot10^{-2}$ м·К, где h — постоянная Планка; c — скорость света, k — постоянная Больцмана). Из (5.4) можно получить законы Вина и Стефана — Больцмана. На рис. 5.1 приведены кривые излучения черного тела при разных температурах.

Рисунок 5.2 дает представление о коэффициентах полезного действия (КПД) излучения черного тела. Кривая *1* — спектральное распределение излучения черного тела при температуре T. Площадь A, ограниченная этой кривой и осью абсцисс, соответствует потоку излучения тела при указанной температуре. Заштрихованная горизонтальными штрихами площадь $Б$ выражает поток излучения, приходящийся на видимую область спектра. Небольшая площадь B с двойной штриховкой соответствует потоку излучения, воспринимаемому нашим глазом, который называется световым потоком Ф. Из рисунка видно, как мала доля потока излучения черного тела, которая воспринимается глазом в виде света.

[1] Прежнее название спектральной плотности энергетической светимости — «излучательная способность».



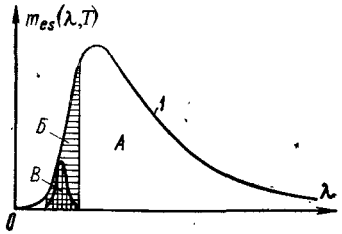


Рис. 5.1. Кривые спектрального распределения излучения черного тела при разных температурах

Рис. 5.2. Графическое определение различных КПД излучения черного тела

Отношение потока излучения воспринимаемого глазом, ко всему потоку излучения абсолютно черного тела (т. е. отношение площадей *В* и *А*) называется *световым* КПД излучения черного тела, который характеризует его экономичность. Однако обычно экономичность черного тела оценивают не световым КПД, а световой отдачей $\eta_{vs} = \Phi/P_s$. Подсчитано, что максимальное значение световой отдачи черного тела равно 89,5 лм/Вт и достигается при температуре 6600 К [1].

Отношение площадей *Б* и *А* соответствует *энергетическому* КПД излучения, а площадей *В* и *Б* — КПД *видимого излучения*.

Выше речь шла о черном теле. Реальные (нечерные) тела имеют кривые спектрального распределения подобные кривым черного тела при условии равенства температур излучателей. У некоторых тел, называемых *избирательными* (селективными), указанное подобие не наблюдается. Для характеристики излучения реальных тел, в том числе и металлов, используют законы теплового излучения черного тела, с внесением в них необходимых экспериментально установленных уточнений. Так, для энергетической светимости металлов может быть принято выражение, аналогичное закону Стефана — Больцмана:

$$M_{eT} = \varepsilon(T) M_{esT} = \varepsilon(T)\sigma_0 T^4, \qquad (5.5)$$

где $\varepsilon(T)$ — интегральный коэффициент излучения металлов.

В свою очередь спектральное распределение излучения металлов аналогично закону Планка и может быть записано в следующем виде:

$$m_e(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) m_{es}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1}, \qquad (5.6)$$

где $m_e(\lambda, T)$ — спектральная плотность энергетической светимости реального тела, а $\varepsilon(\lambda, T)$ — спектральный коэффициент излучения металла.

Излучение реальных тел, как правило, состоит из собственного и отраженного излучения. В этих случаях

$$\varepsilon(T) = \alpha(T)\gamma(T); \qquad (5.7)$$

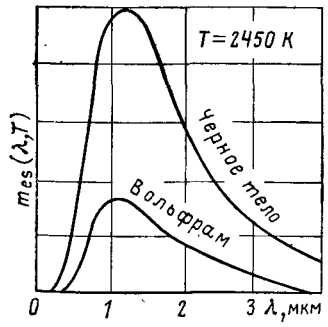
$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)\gamma(\lambda, T), \qquad (5.8)$$

где $\alpha(T)$ и $\alpha(\lambda, T)$ — интегральный и спектральный коэффициенты поглощения, а $\gamma(T)$ и $\gamma(\lambda, T)$ — соответствующие коэффициенты почернения излучения (отношение соответственно полных энергетической светимости и ее спектральной плотности к собственным).

Значения коэффициентов почернения реальных излучателей зависят от их формы, расположения по отношению к другим телам и других факторов. Чем выше коэффициент почернения, тем больше излучение приближается к излучению черного тела.

При конструировании ламп накаливания особый интерес представляют свойства излучения тугоплавких металлов и прежде всего вольфрама, который является и в обозримом будущем будет оставаться главным материалом для тела накала. Тугоплавкие металлы, в том числе вольфрам, обладают избирательным (селективным) излучением. Это видно из рис. 5.3, на котором максимум спектральной плотности энергетической светимости вольфрама сдвинут по сравнению с черным телом в сторону более коротких волн при одинаковой температуре излучателей. Рисунок 5.4 показывает, что при повышении температуры избирательные свойства вольфрама ослабляются, однако этот ущерб компенсируется одновременным возрастанием потока излучения и светового потока.

Спектральный коэффициент излучения вольфрама увеличивается с уменьшением длины волны, в видимой области он больше, чем в инфракрасной. Поэтому световой КПД излучения и световая отдача вольфрама, как и других металлов, больше, чем у черного тела при той же температуре (рис. 5.5). Наибольшая световая отдача излучения вольфрама, которая может быть получена при температуре его плавления ($T_{пл} \approx 3650 \pm 50$ К), составляет 52—54 лм/Вт [1].



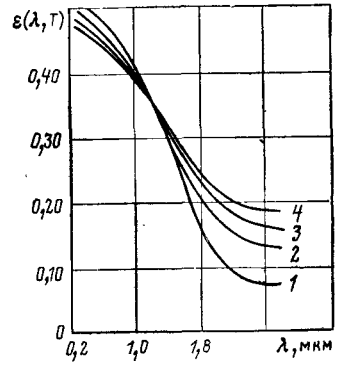


Рис. 5.3. Кривые спектрального распределения излучения вольфрама и черного тела

Рис. 5.4. Зависимость спектрального коэффициента излучения вольфрама от длины волны при различных температурах:
1 — 300 К; *2* — 1200 К; *3* — 1700 К; *4* — 2100 К

Особенностью металлов является зависимость их яркости от направления излучения. Вольфрам дает наибольшую яркость при наблюдении под углом 70° к нормали. Например, при наблюдении накаленной цилиндрической вольфрамовой нити центральная часть ее представляется менее яркой, чем участки, расположенные ближе к краям.

Для характеристики излучения вольфрама кроме цветовой температуры $T_ц$ (§ 1.2) используются энергетическая температура $T_э$ (температура, при которой черное тело имеет ту же энергетическую светимость, что и рассматриваемое тело) и яркостная $T_я$ (температура черного тела, при которой для данной длины волны оно имеет ту же спектральную плотность энергетической яркости, что и рассматриваемое тело).

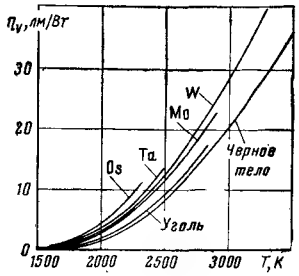


Рис. 5.5. Световая отдача некоторых металлов, угля и черного тела в зависимости от температуры

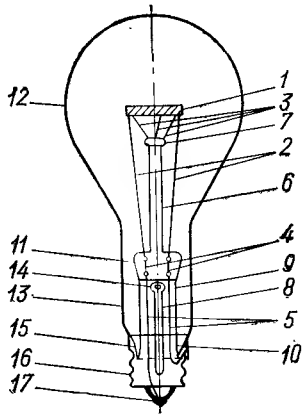


Рис. 5.6. Схематическое изображение лампы накаливания

Итак, в основе создания ламп накаливания лежит использование для получения света теплового излучения нагретого электрическим током проводника, которое подчиняется определенным законам. Задача конструктора заключается в том, чтобы создать оптимальные условия для преобразования электрической энергии в свет через нагрев проводника.

С этих позиций рассмотрим устройство электрической лампы накаливания, пользуясь схематическим (принципиальным) изображением лампы, приведенным на рис. 5.6.

Главной частью любой лампы накаливания является тело накала *1*, нагревание которого проходящим через него электрическим током приводит к излучению света. Оно изображено на рисунке условно заштрихованным прямоугольником. На самом деле тело накала может быть выполнено из нити, спирали, биспирали, триспирали, иметь разные размеры и форму (см. рис. 7.15).

Для того чтобы тело накала в процессе работы сохраняло исходную форму, его фиксируют в пространстве с помощью внутренних звеньев электродов — вводов *2* и держателей *3*. В зависимости от типа ламп электроды могут быть одно-, двух- и трехзвенными. На рис. 5.6 показаны трехзвенные электроды, состоящие из ввода *2*, изготовляемого из никеля, ферроникеля, меди или платинита в зависимости от типа ламп, среднего звена — платинитового впая *4* и внешнего звена — вывода *5*, обычно медного или платинитового.

Электроды и держатели являются частью так называемой ножки. Это стеклянный конструктивный узел лампы, который кроме электродов и держателей включает в себя стеклянный цельный или пустотелый штабик *6* с линзой *7*, стеклянный пустотелый штенгель *8* и стеклянную трубку-тарелку *9*, развернутую в нижней части (развертка) *10*. Эти детали соединены между собой путем сплавления стеклянных элементов в зоне лопатки *11*. Ножка служит опорой для тела накала и вместе с колбой *12* обеспечивает герметизацию лампы. Примеры исполнений ножек даны на рис. 8.2.

Для нормальной работы раскаленного тела накала, которое в большинстве случаев представляет собой вольфрамовую спирализованную нить, недопустимо присутствие кислорода. Поэтому тело накала размещают либо в безвоздушной среде (такие лампы называются вакуумными), либо в среде так называемых инертных газов или их смесей, не реагирующих с материалом тела накала (газополные лампы). Конструктивно эта задача решается следующим образом: ножку с телом накала помещают в стеклянный баллон (колбу) *12*; горло колбы *13* герметично спаивают с разверткой тарелки; через штенгель и откачное отверстие *14* из колбы откачивают воздух, и в газополную лампу после этого вводят инертный газ; наконец, запаивают штенгель, герметично закрывая тем самым внутреннее пространство лампы.

Для удобства эксплуатации на горловине лампы *15* с помощью цоколевочной мастики укрепляют цоколь, к корпусу *16* и контактной пластине *17* которого припаиваются или приваиваются выводы электродов. В зависимости от назначения лампы применяются разные типы цоколей; примеры исполнения их даны на рис. 9.16—9.19.

Приведенные на рис. 5.6 узлы и детали входят, в принципе, в состав всех электрических ламп накаливания. Но в одних лампах они применяются полностью, а в других — частично. Размеры и формы деталей и узлов ламп и их компоновка могут настолько различаться, что лампы становятся совсем непохожими друг на друга не только внешне, но и по своим параметрам.

Например, много специфичного в конструкции имеют светорассеивающие и светонаправляющие лампы специального назначения: автомобильные и самолетные лампы-фары, автомобильные, кинопроекционные и другие лампы со встроенными отражателями и др. (рис. 5.7). Сюда же относятся миниатюрные линзовые лампы (см. рис. 5.16,*б*),

купол колбы которых выполнен в виде двояковыпуклой линзы, что позволяет сконцентрировать световой пучок в небольшом угле. Характерной особенностью перечисленных ламп является применение различного рода покрытий, рельефов и оптических элементов на колбах, а также разнообразных встроенных деталей, обеспечивающих заданное распределение света в пространстве.

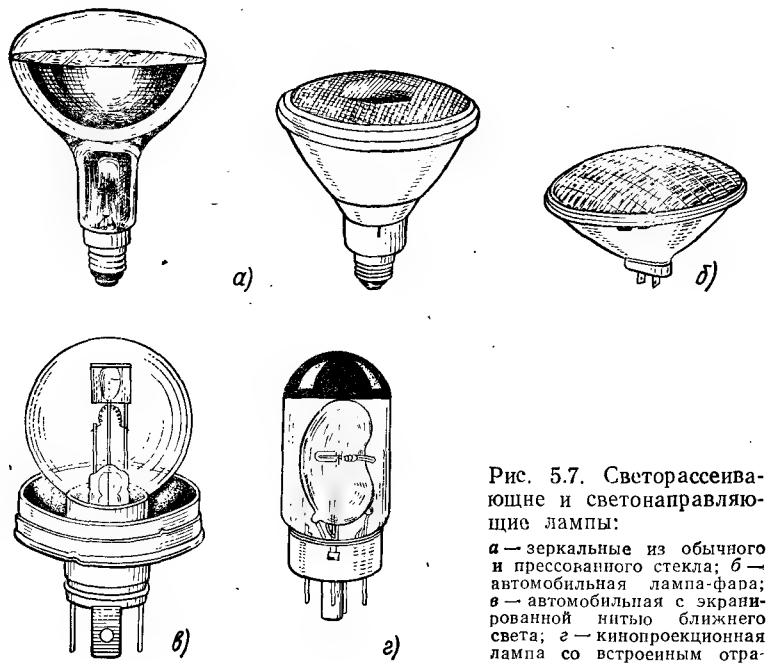


Рис. 5.7. Светорассеивающие и светонаправляющие лампы:

а — зеркальные из обычного и прессованного стекла; *б* — автомобильная лампа-фара; *в* — автомобильная с экранированной нитью ближнего света; *г* — кинопроекционная лампа со встроенным отражателем

Особую конструкцию имеют миниатюрные и сверхминиатюрные лампы накаливания (см. рис. 5.16). У миниатюрных ламп ножка представляет собой стеклянную бусинку со впаянными в нее двумя платинитовыми электродами. Сверхминиатюрные лампы имеют практически безножечную конструкцию, а штенгелем служит сама колба, суженная в зоне отпайки. Специфичны конструкции галогенных ламп накаливания, о которых подробно будет рассказано в гл. 10.

Несмотря на различное конструктивное исполнение, главные задачи отдельных узлов и деталей для всех электрических ламп накаливания остаются одними и теми же. Это — те задачи, которые решает конструктор лампы: рассчитать и сконструировать тело накала; обеспечить фиксированное положение его в пространстве; выбрать оптимальный состав среды, окружающей тело накала; изолировать герметично тело накала и окружающую его среду от внешнего пространства; обеспечить удобное и безопасное присоединение лампы (тела накала) к электрической сети.

5.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Все многообразие ламп накаливания (более 1500 наименований), можно классифицировать, т. е. разделить на классы, по определенному общему для каждого класса признаку. Лампы накаливания чаще всего классифицируют: 1) по назначению (областям применения); 2) по конструктивно-технологическим признакам.

С точки зрения назначения лампы накаливания подразделяют на лампы *общего назначения* и *специальные*. При более подробной классификации выделяют следующие основные группы ламп:

1) общего назначения, предназначенные для освещения помещений и открытых пространств;

2) местного освещения, используемые для освещения индивидуальных рабочих мест в производственных помещениях;

3) транспортные, отличающиеся, как правило, повышенной стойкостью к вибрационным и ударным нагрузкам;

4) для сигнализации и индикации, удовлетворяющие требованию надежной работы в режиме включений-выключений;

5) для оптических систем и приборов, характеризующиеся небольшими габаритами для размещения ламп в приборах, высокой точностью формы и расположения тела накала относительно цоколя с учетом особенностей приборов, их оптических систем;

6) метрологические, имеющие строго заданные стабильные световые параметры и выполняющие роль эталонов сравнения;

7) для технологических целей, в том числе для сушки и нагрева в промышленности, для фотографии, для облучения животных и растений и др. К лампам этого класса предъявляются особые требования по спектральному составу излучения, отвечающему тем или иным приемникам;

8) для специальных светотехнических систем и установок со специальными или уникальными требованиями.

В основу конструкторско-технологической классификации ламп накаливания можно положить разные признаки. Наибольшее значение имеет классификация, когда в каждый класс объединяются лампы, изготовление которых может осуществляться на однотипном технологическом оборудовании. В основе такой классификации лежат прежде всего размер и форма колб. Конструкция колбы определяет характер практически всего сборочного оборудования, поскольку от нее во многом зависят размер и конструкция ножки, тела накала, электродов, цоколя. В связи с этим выделяют следующие конструктивно-технологические классы ламп:

1) крупногабаритные (диаметр колб $d_к$ более 80 мм, длина ламп l более 175 мм; форма колб — преимущественно шар-конус);

2) среднегабаритные ($d_к=40\div80$ мм; $l=75\div175$ мм; форма колб — шар-конус и грибообразные);

3) малогабаритные ($d_к=25\div40$ мм; $l=30\div75$ мм; форма колб — шар-конус или шар);

4) миниатюрные ($d_к=5\div20$ мм; $l=10\div30$ мм; колбы шарообразные или цилиндрические; ножки ламп, как правило, бусинковые);

5) сверхминиатюрные (диаметр колб до 5 мм; длина лампы до 10 мм; безножечная конструкция);

6) цилиндрические (в цилиндрических колбах диаметром от 15 до 30 мм; длина ламп до 80 мм; преимущественно одноцокольные с телом накала, расположенным по оси цилиндра);

7) лампы-фары (в колбах специальной формы диаметром от 100 до 200 мм, сваренных из штампованных стеклянных деталей, выполняющих роль отражателя и рассеивателя);

8) галогенные (в кварцевых трубчатых колбах диаметром от 5 до 15 мм; длина ламп от 15 до 500 мм).

Лампы накаливания могут классифицироваться и по другим признакам, например по напряжению, мощности. Широко распространена классификация по характеру среды, окружающей тело накала. По этому признаку лампы делятся на вакуумные, газополные (аргоновые, криптоновые, ксеноновые с разным содержанием азота), галогенные (в которых к наполняющему газу добавляются йод и некоторые летучие химические соединения галогенов). Классификация возможна также по конструкции ножки, тела накала и держателей, впаев в стекло, по маркам колбочного стекла и ряду других второстепенных признаков.

Приведенная классификация ламп накаливания помогает определить основные черты конструкции новой лампы на основании требований потребителя. Прежде всего устанавливается класс новой лампы по назначению с учетом требований потребителя. Затем выбирается наиболее близкая по назначению из существующих ламп так, чтобы ее конструкцию можно было бы принять за базу. Таким образом, новая лампа будет входить в один из конструктивно-технологических классов. Дальнейшая работа заключается в том, чтобы, изменяя базовую конструкцию, полностью удовлетворить специфические требования потребителя и максимально использовать имеющееся технологическое оборудование для изготовления новых ламп, сократив затраты на организацию их производства.

5.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Параметры ламп накаливания. Указанные в § 1.2 параметры источников света используются и для характеристики ламп накаливания,

но имеют в этом случае некоторые специфические особенности. Заметим, прежде всего, что многие параметры ламп накаливания имеют весьма широкий диапазон — так называемый ряд номинальных значений. Ряд напряжений простирается от единиц до 380 В, ряд мощностей — от долей ватта до 10—20 кВт. Значения светового потока различаются от долей люмена до сотен тысяч люменов, силы света — от долей канделы до десятков тысяч кандел, диаметр колбы — от 1—2 мм до 200 мм и более.

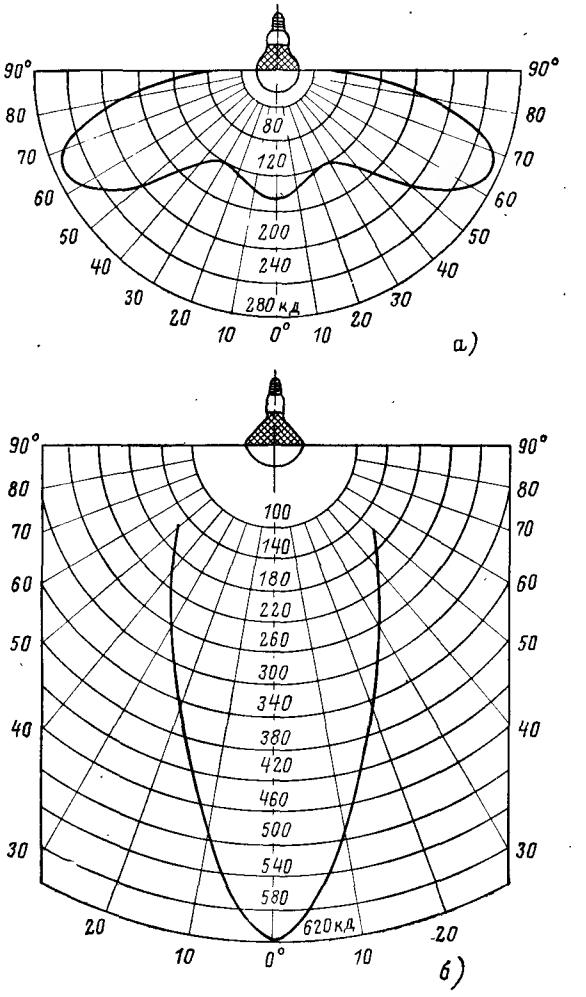


Рис. 5.8. Продольные кривые силы света зеркальной лампы с широким (*а*) и узким (*б*) светораспределением

Кроме общепринятых электрических параметров (номинальные напряжение U, мощность P и ток I) для ряда ламп накаливания вводится *расчетное* напряжение $U_р$ — наиболее вероятное напряжение, при котором лампа будет работать, близкое к среднему фактическому. Оно указывается для некоторых специальных ламп, питающихся от автономных источников (аккумуляторных батарей, автомобильных генераторов, сухих элементов и т. п.), выходное напряжение которых существенно изменяется во время работы. Для ламп накаливания общего назначения введены четыре значения расчетного напряжения в связи с большими отклонениями напряжения от номинала в сетях у различных потребителей.

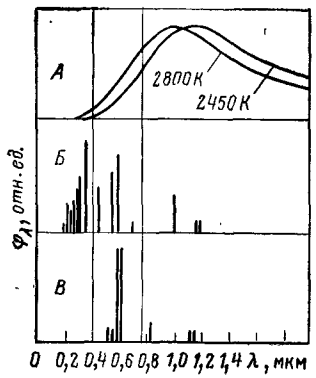


Рис. 5.9. Спектры излучения некоторых источников света

Численные значения U и P наносятся на колбу или цоколь лампы. Для ряда ламп накаливания вместо мощности указывают значение тока.

Световые параметры ламп накаливания те же, что и у других источников света (световой поток Φ, определяемый по формуле (1.1); сила света I_V; яркость L). Для ламп с зеркализованными колбами и встроенными экранами нормируются кривые силы света (на рис. 5.8 они приведены для зеркальных ламп с широким и узким светораспределением). Для некоторых зеркальных ламп нормируется *осевая* сила света — значение силы света в направлении их оптической оси. Вместо силы света иногда нормируется световой поток, излучаемый в нижнюю полусферу или какую-нибудь другую зону. Для большинства зеркальных ламп КПД равен 0,75÷0,80, а коэффициент усиления лежит в пределах от 3 (широкое светораспределение) до 20 (узкое светораспределение).

Лампы накаливания существенно отличаются друг от друга по яркости. Лампы для кинопроекторов, прожекторов, светосигнальных приборов должны иметь наименьшие размеры светящегося тела при возможно большем световом потоке. Тело накала таких ламп делают как можно более компактным и придают ему максимальную температуру. В других случаях, например в лампах для освещения жилых помещений, высокая яркость вредна и часто применяют матированные или молочные колбы, которые ее снижают. Так, спиральная вакуумная лампа мощностью 40 Вт имеет габаритную яркость (габаритная яркость — отношение силы света в направлении, перпендикулярном светящей поверхности, к площади, заключенной в габарите этой поверхности) при прозрачной колбе около 2000 ккд/м², а при матированной — 20 ккд/м².

Методология измерения световых и электрических параметров ламп накаливания регламентируется ГОСТ 17616-80 «Лампы накаливания электрические. Методы измерения световых и электрических параметров».

Спектральные и цветовые параметры ламп накаливания не так важны, как у газоразрядных ламп, поскольку они в меньшей степени поддаются регулированию. На рис. 5.9 показан их спектр при температурах тел накала 2450 и 2800 К (А), который является сплошным (непрерывным). Для сравнения показаны также линейчатые спектры излучения газоразрядных ртутной (Б) и натриевой (В) ламп, состоящие из отдельных спектральных линий.

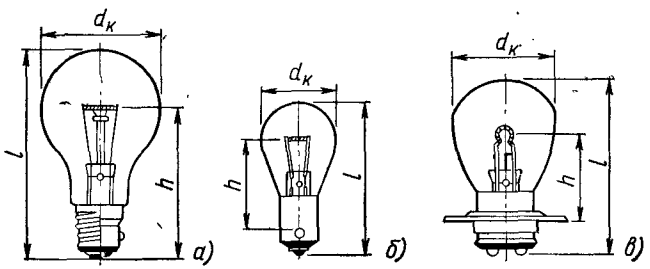


Рис. 5.10. Геометрические параметры ламп накаливания

Относительно невысокие рабочие температуры нити (2400—2600 К; при этом $T_ц \approx 2500 \div 2700$ К) приводят к тому, что в видимом излучении ламп накаливания преобладают оранжево-красные лучи. Поэтому при освещении ими усиливаются «теплые» цветовые тона (красные, оранжевые, коричневые) и ослабляются «холодные» (зеленые, голубые, фиолетовые), что не позволяет обеспечить такую же цветопередачу, какую дает естественный дневной свет. Спектральные и цветовые параметры ламп накаливания зависят от материала тела накала, его рабочей температуры, от спектров поглощения и пропускания стенок колбы и наносимых на нее декоративных и других покрытий. Все эти рычаги в той или иной мере находятся в руках конструкторов ламп. Несколько улучшенную цветность и цветопередачу имеют криптоновые биспиральные, низковольтные проекционные и галогенные лампы накаливания, в которых имелась возможность повысить температуру тела накала. Улучшить эти параметры можно также путем применения светофильтров и цветных колб, поглощающих часть оранжево-красного излучения; такими средствами в принципе можно повысить цветовую температуру ламп до 3500—4000 К, но световой поток при этом снизится на 30—35%.

В большинстве стандартов и технических условий на лампы накаливания указываются следующие геометрические параметры: полная длина лампы l с указанием допусков, наименьший допустимый диаметр колбы $d_к$ и высота светового центра h. На рис. 5.10 указаны те

отметки на цоколе, от которых измеряется расстояние до светового центра, т. е. h. Для резьбовых цоколей такой отметкой обычно является верхняя точка припоя на центральном контакте цоколя (рис. 5.10,*а*), для штифтовых — точка касания штифта с патроном (рис. 5.10,*б*), для фокусирующих — нижняя поверхность фокусирующего фланца (рис. 5.10,*в*). В некоторых специальных лампах высоту светового центра отсчитывают от центра спирали до вершины купола колбы. Для кинопроекционных и ряда других специальных ламп в стандартах и технических условиях в числе геометрических параметров указываются габаритные размеры тела накала.

Из основных конструктивных параметров ламп накаливания (форма и расположение тела накала, конструкция ножки, форма колбы, тип цоколя) только тип цоколя обязательно регламентируется в нормативно-технической документации. Другие параметры являются рекомендуемыми и указываются в стандартах и технических условиях на схематических изображениях ламп. В редких случаях (например, для некоторых ламп накаливания общего назначения) в стандартах указывается характер среды, окружающей тело накала.

Лампы накаливания весьма чувствительны к различным регулярным и случайным механическим и климатическим воздействиям, которые появляются в процессе транспортировки и эксплуатации ламп. Для оценки их пользуются параметрами, указанными в § 1.2.

Вибрационные воздействия на лампы накаливания имеют особое значение. Для каждой детали лампы, выведенной из состояния равновесия, характерна определенная, свойственная ей, собственная частота колебаний. Например, участки биспирали между держателями лампы Б220-230-100 резонируют при частоте 100 Гц, а вводы этих ламп — при 180—200 Гц. Если одна из этих частот совпадает с частотой, воздействующей на лампу вибрации, то возникнут резонансные колебания соответствующего элемента лампы, которые могут привести к выходу детали и лампы из строя. Ударные воздействия характеризуются малой длительностью ударного импульса и высоким значением силы инерции, действующей на детали ламп. Они вызывают особо вредное действие на тело накала, поддержки, вводы и могут привести к смещению, искривлению или обрыву их.

Значения вибрационных и ударных нагрузок указываются в нормативно-технической документации на лампы. Например, железнодорожные лампы должны выдерживать вибрационную нагрузку с частотой 25 Гц и ускорением 25 м/с^2 в течение 6 ч (из них 3 ч — с подачей напряжения на лампу), а также ударную нагрузку из 1000 ударов с максимальным ускорением 30 м/с^2 и длительностью удара 40—80 мс в течение времени, соответствующего 500 ударам (из них 250 ударов — с подачей напряжения на лампу). Для автомобильных и некоторых других ламп значения этих параметров еще выше. Так, некоторые сверхминиатюрные лампы выдерживают многократные удары с ускорением 1500 м/с^2 и более. Имеется ряд способов повышения механической прочности ламп: уменьшение длины и увеличение диаметра деталей для повышения собственной частоты колебаний по сравнению с частотой действующих вибраций; совершенствование способов крепления ламп в световых приборах и установках (улучшение амортизации и др.).

Для оценки прочности крепления цоколя к колбе ламп накаливания в ГОСТ и ТУ нормируются значения прилагаемых к цоколям крутящих моментов, которые в зависимости от диаметра присоединительной части корпуса цоколя до испытания ламп на срок службы лежат в пределах от 0,05 до 5 Н·мм, а после истечения срока службы — примерно в 2 раза меньше. Прочность крепления цоколя у некоторых специальных ламп проверяется наложением на цоколь определенного отрывного усилия или многократным вставлением лампы в соответствующий патрон.

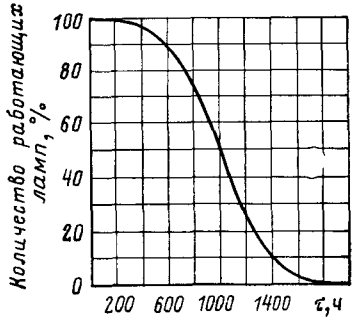


Рис. 5.11. Типичная кривая выхода ламп из строя

Большинство ламп накаливания эксплуатируется в нормальных климатических условиях: наружная температура +25±10 °С, атмосферное давление 950—1050 гПа (720—788 мм рт. ст.), относительная влажность воздуха 65±15%. Однако к ряду ламп (для тропического климата, для самолетов и судов, для глубоководного погружения, герметизированных арматур, животноводческих помещений и др.) предъявляются особые климатические требования, которые фиксируются в ГОСТ и ТУ. При конструировании ламп и разработке технологии их изготовления применяют разнообразные средства для достижения заданных климатических параметров: выбор материала колбы, расчет формы и размеров ее, подбор влагостойкой цоколевочной мастики, антикоррозионная защита цоколя и др.

Для оценки долговечности, надежности и стабильности ламп накаливания используют все указанные в § 1.2 разновидности сроков службы (полный $\tau_{полн}$, средний τ, гарантированный $\tau_г$, полезный $\tau_п$) и показатели надежности и стабильности (наработка на отказ, вероятность безотказной работы, коэффициент стабильности). На рис. 5.11 показана типичная кривая выхода ламп из строя, полученная в результате обработки результатов многочисленных испытаний ламп [6]. Характер этой кривой позволяет для задач текущего контроля за средний срок службы ламп принимать отрезок времени, в течение которого вышло из строя 50% ламп из партии, поставленной на испытания.

Средний срок службы ламп накаливания находится в пределах от нескольких десятков часов до 1—3 тыс. ч. На основе многолетнего опыта принято, что лампы накаливания общего назначения целесообразно рассчитывать на средний срок службы, примерно равный 1000 ч.

В ГОСТ и ТУ на большинство типов ламп накаливания указываются требования по стабильности светового потока (регламентируется световой поток после заданного числа часов горения лампы). Этот показатель у ламп накаливания довольно высок. Коэффициент стабильности для вакуумных ламп общего назначения равен 0,87—0,90, а для газополных — 0,91—0,95. Для многих специальных ламп в нормативно-технической документации указываются показатели надежности.

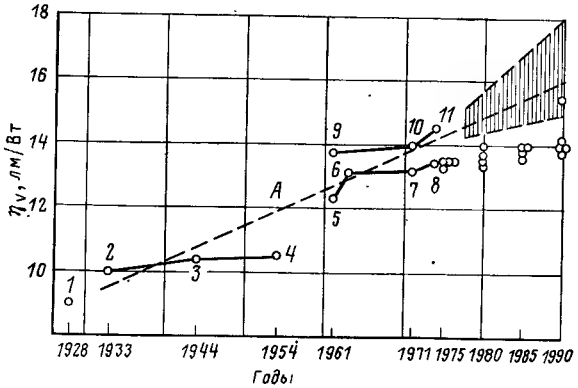


Рис. 5.12. Динамика роста световой отдачи ламп накаливания (на примере лампы 100 Вт, 220 В):

1 — вакуумная лампа с прямой вольфрамовой нитью; *2—4* — аргоновая моноспиральная; *5—8* — аргоновая биспиральная; *9—11* — криптоновая биспиральная. Кривая *A* характеризует тенденцию роста η_V. Заштрихована область возможных значений η_V. Отдельно стоящие точки — оценки экспертов для аргоновых биспиральных ламп

Главным показателем экономичности ламп накаливания, как и других источников света, является световая отдача, определяемая по соотношению (1.6). Номинальная световая отдача ламп накаливания общего назначения при расчетном напряжении и среднем сроке службы 1000 ч находится в пределах от 6,7 лм/Вт (лампа В230-240-15) до 19,1 лм/Вт (лампа Г127-135-1000). Относительно невысокая световая отдача ламп накаливания в значительной мере объясняется их физической природой: световой КПД вакуумных ламп равен 1,5%, а газополных — 2—4%. Однако и эти рубежи далеко не достигнуты, хотя за последние десятилетия много сделано для повышения световой отдачи ламп накаливания (рис. 5.12). Задача повышения световой отдачи без сокращения срока службы ламп остается актуальной; даже частичное решение ее дает в масштабах страны большую экономию электроэнергии.

Характеристика отдельных групп ламп накаливания. 1. Лампы *общего назначения* вакуумные В, биспиральные аргоновые Б, биспиральные криптоновые БК, газополные моноспиральные Г (ГОСТ 2239-79) рассчитаны на включение в электрические сети напряжением 127 и 220 В; диапазон мощностей $P=15\div1000$ Вт; диапазон световых потоков $\Phi=85\div19\,500$ лм; диаметры колб $d_к=61\div151$ мм; длины ламп $l=90\div345$ мм; применяемые цоколи—Е27/27, Е27/30, Е40/45. Для ламп мощностью до 150 Вт включительно допускается применение цоколя В22*d*/25, при котором полная длина лампы уменьшается на 1,5 мм, а высота светового центра — на 8 мм. В ГОСТ 2339-79 предусмотрен выпуск ламп на расчетные напряжения 130, 220, 225, 235 и 240 В (на лампах наносятся соответственно диапазоны напряжений: 125—135, 215—225, 220—230, 230—240 и 235—245 В). Лампы на 230—240 В и 235—245 В предназначены для использования там, где в сетях наблюдается повышенное напряжение. При расчетном напряжении средняя продолжительность горения ламп должна быть не менее 1000 ч, а продолжительность горения каждой лампы — не менее 700 ч. Значения светового потока, приведенные в ГОСТ, справедливы лишь для ламп в прозрачных колбах; в матированных колбах они уменьшаются на 3, в опаловых на 10 и в молочных на 20 %. На рис. 5.13 показаны образцы ламп общего назначения, а в табл. 5.1 — их параметры.

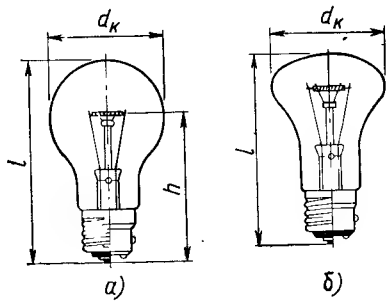


Рис. 5.13. Лампы накаливания общего назначения:

а — вакуумная или аргоновая моно- и биспиральная; *б* — криптоновая биспиральная

2. Лампы *местного* освещения МО (ГОСТ 1182-77) рассчитаны на напряжения 12 и 36 В; $P=15\div100$ Вт; $\Phi=180\div1550$ лм; $\tau=1000$ ч; $d_к=61\div66$ мм; $l=104\div125$ мм; цоколи — Е27/27 или по требованию заказчика, В22*d*/25, при этом уменьшаются на 2 мм общая длина лампы и на 8 мм — высота светового центра. Лампы изготавливаются в прозрачных колбах, реже—в матированных. Выпускаются также лампы типов МОД и МОЗ с диффузными и зеркальными отражающими покрытиями на колбах. Примеры исполнения ламп показаны на рис. 5.14.

3. *Транспортные* лампы:

Таблица 5.1 **Параметры ламп накаливания общего назначения с расчетными напряжениями 130 и 220 В**

Тип ламп	$U_р$, В	Номинальные значения					Тип цоколя
		P, Вт	Ф, лм	$d_к$, мм	l, мм	h, мм	
В125-135-15	130	15	135	61	105	—	Е27/27
В125-135-25	130	25	260	61	105	—	Е27/27
Б125-135-40	130	40	485	61	110	80	Е27/27
БК125-135-40	130	40	520	51	98	80	Е27/27
Б125-135-60	130	60	810	61	110	80	Е27/27
БК125-135-60	130	60	875	51	98	80	Е27/27
Б125-135-100	130	100	1540	61	110	80	Е27/27
БК125-135-100	130	100	1630	56	105	80	Е27/27
Г125-135-150	130	150	2280	71	137	100	Е27/27
Г125-135-150-1	130	150	2280	81	166,5	128	Е27/27
Г125-135-200	130	200	3200	81	166,5	128	Е27/27
Г125-135-300	130	300	4900	91	184	133	Е27/30
Г125-135-300-1	130	300	4900	111	240	178	Е40/45
Г125-135-500	130	500	8700	111	240	178	Е40/45
Г125-135-1000	130	1000	19 100	151	309	225	Е40/45
В215-225-15	220	15	105	61	105	—	Е27/27
В215-225-25	220	25	220	61	105	—	Е27/27
Б215-225-40	220	40	415	61	110	80	Е27/27
БК215-225-40	220	40	460	51	98	80	Е27/27
Б215-225-60	220	60	715	61	110	80	Е27/27
БК215-225-60	220	60	790	51	98	80	Е27/27
Б215-225-75	220	75	950	61	110	80	Е27/27
БК215-225-75	220	75	1020	56	105	80	Е27/27
Б215-225-100	220	100	1350	61	110	80	Е27/27
БК215-225-100	220	100	1450	56	105	80	Е27/27
Б215-225-150	220	150	2100	71	137	100	Е27/27
Б215-225-150-1	220	150	2100	81	166,5	128	Е27/27
Г215-225-150	220	150	2090	71	137	100	Е27/27
Г215-225-150-1	220	150	2090	81	166,5	128	Е27/27
Б215-225-200	220	200	2920	81	166,5	128	Е27/27
Г215-225-200	220	200	2920	81	166,5	128	Е27/27
Г215-225-300	220	300	4610	91	184	133	Е27/30
Г215-225-300-1	220	300	4610	91	189	133	Е40/45
Г215-225-500	220	500	8300	111	240	178	Е40/45
Г215-225-750	220	750	13 100	151	309	225	Е40/45
Г215-225-1000	220	1000	18 600	151	309	225	Е40/45

автомобильные А для автомобилей, тракторов, мотоциклов и других самоходных машин (ГОСТ 2023-75, ТУ 16). Это — лампы на напряжение 6, 12 и 24 В. Их мощность $P=0{,}6\div80$ Вт; сила света $I_V=1\div60$ кд; световая отдача $\eta_V=5\div18$ лм/Вт; $\tau=125\div1500$ ч; $d_к=11\div36$ мм; $l=24\div60$ мм;

железнодорожные лампы выпускаются в обычной Ж, матированной ЖМТ, синей ЖСК и трубчатой ЖТ колбах для общего и местного освещения подвижного состава железных дорог (ГОСТ 1181-74; рис. 5.15). Лампа типа ЖГ — для вагонов трамвая и метро на 60 и 120 В, мощностью 60 и 65 Вт (рис. 5.15,*д*);

судовые лампы С для внутреннего освещения судов и сигнализации (ГОСТ 1608-78) выпускаются на напряже-

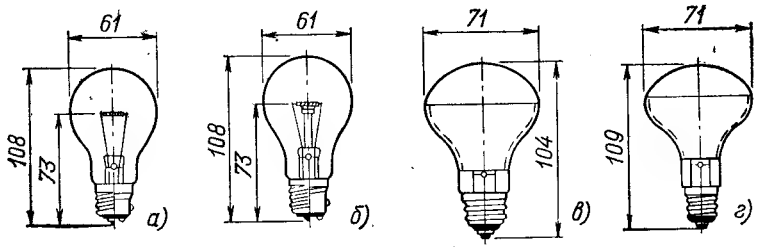


Рис. 5.14. Лампы накаливания местного освещения:
в прозрачной колбе МО12-60 (*а*) и МО36-60 (*б*); в колбе с диффузным МОД36-60 (*в*) и зеркальным МОЗ36-60 (*г*) отражателями

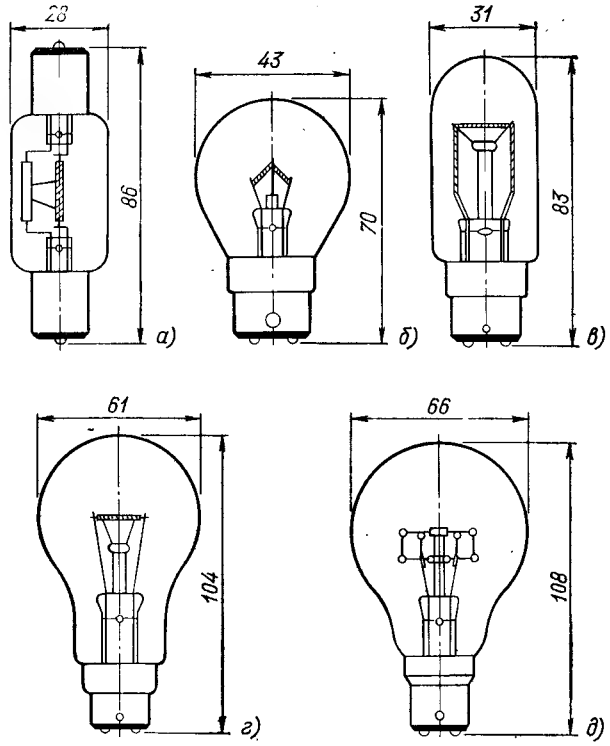


Рис. 5.15. Лампы накаливания железнодорожные:
а — ЖТ54-15; *б* — Ж24-25; *в* — Ж54-10; *г* — Ж54-25; *д* — ЖГ120-60

ние 13—220 В; $P=8\div110$ Вт; $\eta_V=4\div16$ лм/Вт; $\tau=200\div1000$ ч; $d_к=20\div81$ мм; $l=57\div159$ мм;

самолетные лампы СМ могут быть на напряжение от 2,5 до 115 В, но преимущественно на 26 — 28 В. Их мощность $P=0,15\div70$ Вт; $\eta_V=2\div4,5$ лм/Вт; $\tau=30\div1000$ ч; $d_к=4,3\div48$ мм; $l=11,5\div72$ мм, а у софитных ламп — до 285 мм.

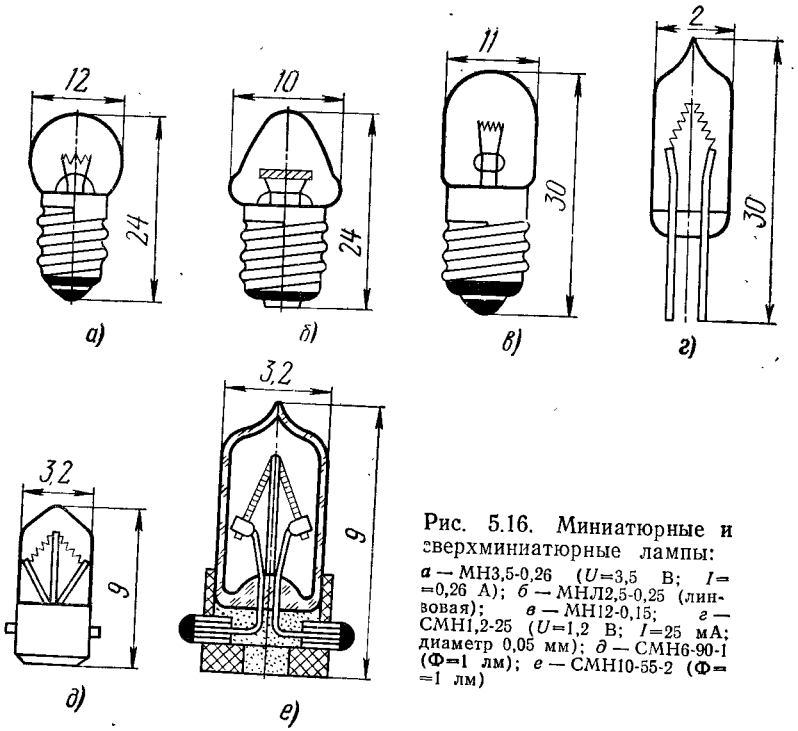


Рис. 5.16. Миниатюрные и сверхминиатюрные лампы:
а — МН3,5-0,26 ($U=3,5$ В; $I=0,26$ А); *б* — МНЛ2,5-0,25 (линзовая); *в* — МН12-0,15; *г* — СМН1,2-25 ($U=1,2$ В; $I=25$ мА; диаметр 0,05 мм); *д* — СМН6-90-1 (Ф=1 лм); *е* — СМН10-55-2 (Ф=1 лм)

4. Лампы для *сигнализации и индикации*:

миниатюрные типа МН для переносных и карманных фонарей, велосипедов, освещения шкал приборов, сигнализации и т. п. (ГОСТ 2204-80) имеют параметры: $U=1\div36$ В; $I=0,068\div0,72$ А; $Ф=2,3\div85$ лм; $\tau=6\div1500$ ч; $d_к=10\div16$ мм; $l=24\div30$ мм (рис. 5.16,*а* — *в*);

сверхминиатюрные лампы в прозрачных типа СМН и красного цвета типа СМНК колбах для сигнальных устройств, пультов управления, медицины и др. Они имеют параметры: $U=1,2\div12$ В; $I=5\div150$ мА; $Ф=0,05\div4$ лм; $\tau=20\div2000$ ч; $d_к=2\div3,2$ мм; $l=9\div32$ мм (рис. 5.16,*г* — *е*);

коммутаторные лампы типа КМ для сигнализации в сетях телефонных коммутаторов (ГОСТ 6940-74). Имеют параметры: $U=6\div60$ В; $I=35\div100$ мА; $Ф=0,4\div5,7$ лм; $\tau=500\div2000$ ч; $d_к=7$ мм; l не более 46 мм;

светофорные лампы типа ЖС для установки в железнодорожных светофорах (ГОСТ 11085-79) имеют параметры: $U=10$ и 12 В; $P=5\div35$ Вт; $Ф=7,6\div10$ лм; $\tau=1000$ ч; $d_к=21\div56$ мм; $l=57\div102$ мм;

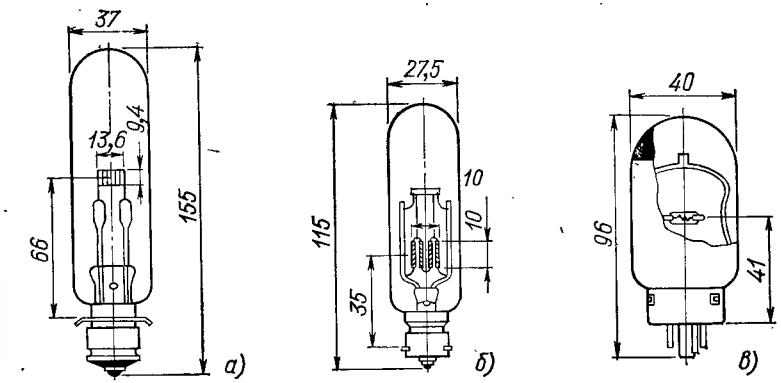


Рис. 5.17. Кинопроекционные лампы:
а — К40-750 ($U=40$ В; $P=750$ Вт; $Ф=21\,800$ лм; $\tau=30$ ч); *б* — К127-300-2 ($Ф=6700$ лм; $\tau=30$ ч); *в* — К21-150 (световой поток $Ф=60$ лм; $\tau=10$ ч)

лампы маячные типа ММ для маяков и других сигнальных приборов (ГОСТ 16301-80) имеют параметры: $U=6$, 12, 32, 50 и 110 В; $P=3\div1000$ Вт; $Ф=22\div22\,000$ лм; $\tau=100\div400$ ч; $d_к=16\div112$ мм; $l=29\div215$ мм;

специальные сигнальные лампы типа СГ и для сигнальных огней аэродромов типа СГА на напряжение $U=1,2\div220$ В. Имеют параметры: $P=0,45\div200$ Вт; $Ф=1,3\div5000$ лм; $d_к=5,5\div66$ мм; $l=17\div155$ мм;

лампы в цилиндрических баллонах на напряжение 127 и 220 В, применяемые для сигнализации Ц (ГОСТ 5011-77).

5. Лампы для *оптических систем* и *приборов*:

кинопроекционные лампы типа К для проекционной, звукозаписывающей, копировальной и другой киноаппаратуры (ГОСТ 4019-74) на напряжение $U=4\div220$ В. Имеют параметры: $P=3\div750$ Вт; $Ф=20\div21\,800$ лм; $\tau=10\div600$ ч; $d_к=22\div180$ мм; $l=51\div267$ мм (рис. 5.17);

лампы для оптических приборов обычные типа ОП, в цилиндрических колбах типа СЦ, с кремниевым окном типа ИК на напряжение $U=2,4\div33$ В, но преимуществен-

но 6, 8, 12 В. Имеют параметры: $P=1{,}2\div100$ Вт; $\Phi=3{,}2\div17\,500$ лм; $\tau=5\div500$ ч; $d_к=4{,}6\div61$ мм; $l=14\div113$ мм;

прожекторные лампы типа ПЖ (ГОСТ 7874-76) выпускаются с параметрами: $U=11\div220$ В; $P=25\div10\,000$ Вт; $\Phi=18\div280\,000$ лм; $\tau=5\div800$ ч; $d_к=43\div275$ мм; $l=70\div460$ мм (рис. 5.18,*а*, *б*);

кинопрожекторные лампы типа КПЖ на напряжение 110 и 220 В, имеют параметры: $P=150\div3000$ Вт; $\Phi=3750\div79\,500$ лм; $\tau=5\div75$ ч (рис. 5.18,*в*);

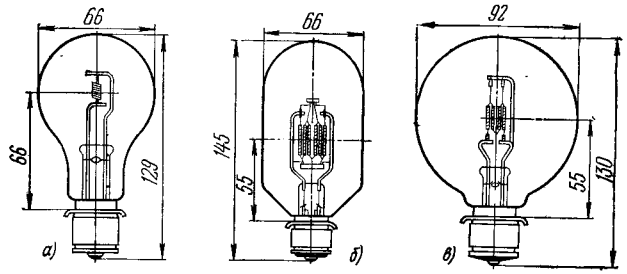


Рис. 5.18. Прожекторные лампы:
а — ПЖ12-28 ($U=12$ В; $P=250$ Вт; $\Phi=6625$ лм); *б* — ПЖ110-500-2 ($U=110$ В; $P=500$ Вт; $\Phi=10\,500$ лм); *в* — КПЖ-2 ($U=110$ В; $P=500$ Вт; $\Phi=14\,000$ лм)

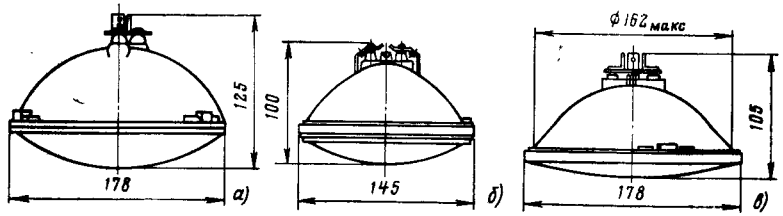


Рис. 5.19. Лампы-фары:
а — АФ-1 ($U=6$ В; $P=50$ Вт; $I_V=22\,000$ кд); *б* — СМФ-1 ($U=26$ В; $I=5{,}3$ А; $I_V=45\,000$ кд); *в* — ИФК-3 ($U=9$ В; $P=75$ Вт; $I_V=30\,000$ кд)

лампы-фары автомобильные типа АФ на напряжение 6 и 12 В, имеют мощность 40, 50 и 100 Вт (рис. 5.19,*а*). Самолетные лампы-фары типа СМФ на напряжение 28 В, имеют мощность 200 и 600 Вт (рис. 5.19,*б*). Инфракрасные лампы-фары типа ИКФ на напряжение 4,5 и 9 В имеют мощность 20 и 75 Вт (рис. 5.19,*в*);

зеркальные лампы накаливания (лампы-светильники) имеют концентрированное ЗК, среднее ЗС и широкое ЗШ светораспределения. Зеркальный слой наносится на колбу со стороны цоколя;

лампы с диффузным отражающим слоем со стороны цоколя выпускаются аргоновые типа ДБ (127 В, 40 — 200 Вт; 220 В, 40 — 300 Вт) и криптоновые типа ДБК (220 В, 60 и 100 Вт).

6. *Метрологические* лампы служат для измерения силы света (лампы типа СИС) и светового потока (лампы типа СИП) (ГОСТ 10771-64; рис. 5.20). Эти лампы называются светоизмерительными и имеют параметры: СИС — $U=10\div107$ В; $P=8{,}6\div915$ Вт; $I_V=5\div1500$ кд; СИП — $U=3{,}5\div107$ В; $P=1{,}9\div260$ Вт; $\Phi=10\div3500$ лм. Кроме того, выпускаются пирометрические лампы для оптических пирометров и специальные лампы с окнами-фильтрами (стеклянными, кремниевыми, сапфировыми и др.).

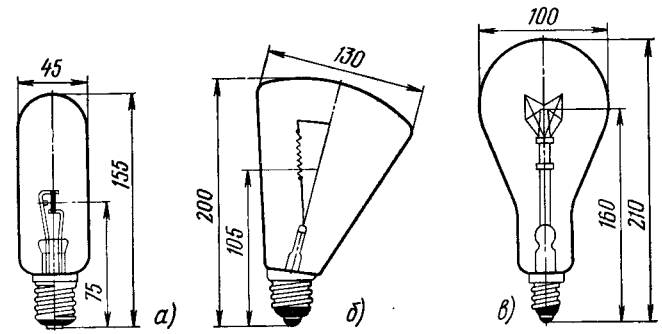


Рис. 5.20. Светоизмерительные лампы:
а — СИ6-100 ($U=6$ В; $P=100$ Вт; $T_ц=2840$ К); *б* — СИС107-100 ($I_V=100$ кд); *в* — СИП107-1500 ($\Phi=1500$ лм)

7. Лампы для *технологических целей*:

инфракрасные зеркальные лампы накаливания, с колбой параболоидной формы, с прозрачным куполом типа ИКЗ и с фильтрующим покрытием на куполе типа ИКЗК (ГОСТ 13874-76). Применяются в облучательных установках для создания интенсивного потока излучения в инфракрасной области спектра. Цветовая температура инфракрасных зеркальных ламп $T_ц=2530\pm100$ К; максимум излучения имеет место при $\lambda_{max}=1100$ нм;

лампы накаливания галогенные инфракрасные типов КГ, КГО (с отогнутыми концами), КГД (дифференциального излучения), КГТ (термоизлучатели) (по ТУ 16), имеющие увеличенную продолжительность горения, применяются для нагрева и сушки;

лампы для фотографии типов Ф и ФД в прозрачной и диффузной колбах служат для освещения объектов при фотосъемке, лампы типов Ф127-25 и Ф220-25 (в оранжевой колбе) — для подсветки при фотопозитивных процес-

сах, лампы типов ФУ127-60 и ФУ220-60 — для фотоувеличителей.

8. Лампы для *специальных светотехнических систем и установок*:

рудничные лампы типа Р для головных, ручных и сигнальных аккумуляторных светильников местного освещения и обозначения подвижного состава в шахтах и рудниках (ГОСТ 12123-74 и ТУ 16). Они имеют следующие параметры: $U=2{,}4\div130$ В; мощность до 60 Вт; $\Phi=16{,}5\div675$ лм; $\tau=50\div1300$ ч; $d_к=16\div66$ мм; $l=37\div133$ мм;

лампы подводного освещения для использования при проведении подводных работ, рыбной ловле на электрический свет. Выпускаются также лампы для эксплуатации в условиях высоких температур, давлений и разрежений.

Кроме перечисленных, выпускается значительное количество других типов ламп накаливания, которые можно отнести к тем или другим группам: декоративные типа Д в свечеобразных и фигурных колбах разных цветов, для швейных машин типа ПШ и бытовых холодильников, медицинские синие МДС для физиотерапевтических целей, более 50 типов ламп разного назначения типа РН, для елочных электрогирлянд и др.

Лампы всех групп и типов должны удовлетворять требованиям ГОСТ 19190-73 «Лампы накаливания электрические. Общие технические условия».

Взаимосвязь параметров ламп накаливания. Все электрические, световые и цветовые параметры, а также срок службы ламп накаливания частично или полностью определяются температурой тела накала T. Эта зависимость при изменении T в пределах до 10 % удовлетворительно описывается уравнениями [8]

$$\frac{P}{P_0}=\left(\frac{T}{T_0}\right)^{4,8};\quad \frac{\Phi}{\Phi_0}=\left(\frac{T}{T_0}\right)^{10,8};$$

$$\frac{\eta_V}{\eta_{V0}}=\left(\frac{T}{T_0}\right)^{6};\quad \frac{\tau}{\tau_0}=\left(\frac{T}{T_0}\right)^{-40}, \qquad (5.9)$$

где T_0, P_0, Φ_0, η_{V0}, τ_0 — исходные температура тела накала, мощность, световой поток, световая отдача и срок службы лампы, а T, P, Φ, η_V, τ — какая-то новая температура и соответствующие новые значения параметров.

Параметры ламп накаливания изменяются при отклонении напряжения питания от номинального. Если эти отклонения не превышают 10 %, то справедливы следующие

отношения [8]:

$$\frac{T}{T_0}=\left(\frac{U}{U_0}\right)^{0,33};\quad \frac{P}{P_0}=\left(\frac{U}{U_0}\right)^{1,58};\quad \frac{\Phi}{\Phi_0}=\left(\frac{U}{U_0}\right)^{3,61};$$

$$\frac{\eta_V}{\eta_{V0}}=\left(\frac{U}{U_0}\right)^{2,03};\quad \frac{\tau}{\tau_0}=\left(\frac{U}{U_0}\right)^{-(11,2-14,8)}, \qquad (5.10)$$

где U_0 — номинальное напряжение, а U — напряжение, отличное от номинального. На рис. 5.21 показан характер изменения некоторых параметров ламп при изменении напряжения на лампе.

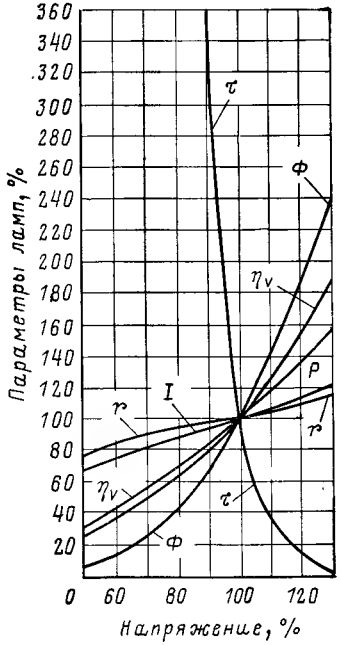


Рис. 5.21. Общий характер зависимости некоторых параметров ламп накаливания от напряжения на лампе

При расчете ламп накаливания широко используется зависимость между сроком службы и световой отдачей

$$\tau=\tau_0(\eta_V/\eta_{V0})^{-z}, \qquad (5.11)$$

где z обычно принимается равным 7.

Зависимость между двумя какими-либо параметрами лампы накаливания, если эти параметры определяются работой тела накала, может быть представлена в указанных выше границах изменения параметров уравнением

$$N/N_0=(B/B_0)^{n_{NB}}, \qquad (5.12)$$

где N_0 и B_0 — исходные значения двух взаимосвязанных параметров; N и B — новые значения тех же параметров, один из которых (B) рассматривается как независимый, а другой (N) — как зависимый от него; n_{NB} — показатель степени, характерный для выбранной пары параметров. Численные значения n_{NB} приведены в табл. 5.2.

Зависимость электрических, световых параметров и срока службы лампы накаливания от многочисленных конструктивных и технологических факторов значительно более сложная. Влияние многих факторов, как будет показано дальше, можно оценить лишь качественно, а для некоторых даны и количественные оценки.

Таблица 5.2

Наименование независимого параметра (В)	Значения показателя степени n_{NB} для различных зависимых параметров (N)						
	T, К	U, В	P, Вт	I, А	Ф, лм	n_V, лм/Вт	τ, ч
Температура тела накала T, К	—	3,0	4,8	1,8	10,8	6,8	—40
Напряжение на лампе U, В	0,33	—	1,6	0,6	3,61	2,03	—(11,2—14,8)
Мощность лампы P, Вт	0,2	0,63	—	0,37	2,22	1,22	—9
Ток I, А	0,55	1,66	2,66	—	6,0	3,3	—23
Световая отдача η_V, лм/Вт	0,17	0,5	0,8	0,3	1,8	—	—7

5.4. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Электрические лампы накаливания, несмотря на быстрый рост производства газоразрядных ламп, продолжают широко применяться и остаются перспективными, о чем свидетельствует, в частности, постоянное увеличение темпов роста их выпуска. Если среднегодовой выпуск ламп накаливания общего назначения в СССР в 1961—1965 гг. принять за 1, то в 1966—1970 гг. он составил 1,4, а в 1971—1975 гг. — 2,8. Такая же картина наблюдается с темпами роста производства на душу населения. Доля светового потока от ламп накаливания в суммарном световом потоке, идущем на освещение, продолжает оставаться высокой. Она составила около 60% в 1970 г., 40—45% — в 1975 г., 34—35% в 1980 г. Устойчивая популярность ламп накаливания объясняется: низкой себестоимостью; удобством в обращении и обслуживании; малыми первоначальными затратами на оборудование освещения; разнообразием конструктивного оформления; широтой параметрического ряда (разные напряжения, мощности, световые потоки); достаточно высокой по сравнению, например, с люминесцентными лампами гигиеничностью (исключены шум от пускорегулирующих аппаратов и возможность загрязнения воздуха ртутью из люминесцентных ламп); высокой технологичностью; наличием реальных путей дальнейшего совершенствования тепловых источников света (см. § 10.2).

Наряду с отмеченными достоинствами, лампы накаливания на фоне газоразрядных ламп имеют и существенные недостатки. Прежде всего, это низкая световая отдача, которая у самых лучших ламп накаливания в 5—10 раз меньше, чем у лучших современных газоразрядных ламп. Срок службы, при таком же сравнении, в 5—20 раз меньше. Обеспечивая приемлемую для многих задач цветопередачу, лампы накаливания совершенно не подходят при выполнении работ, связанных

с точным воспроизведением цветов (окраска и контроль тканей, цветная печать в полиграфической промышленности и др.).

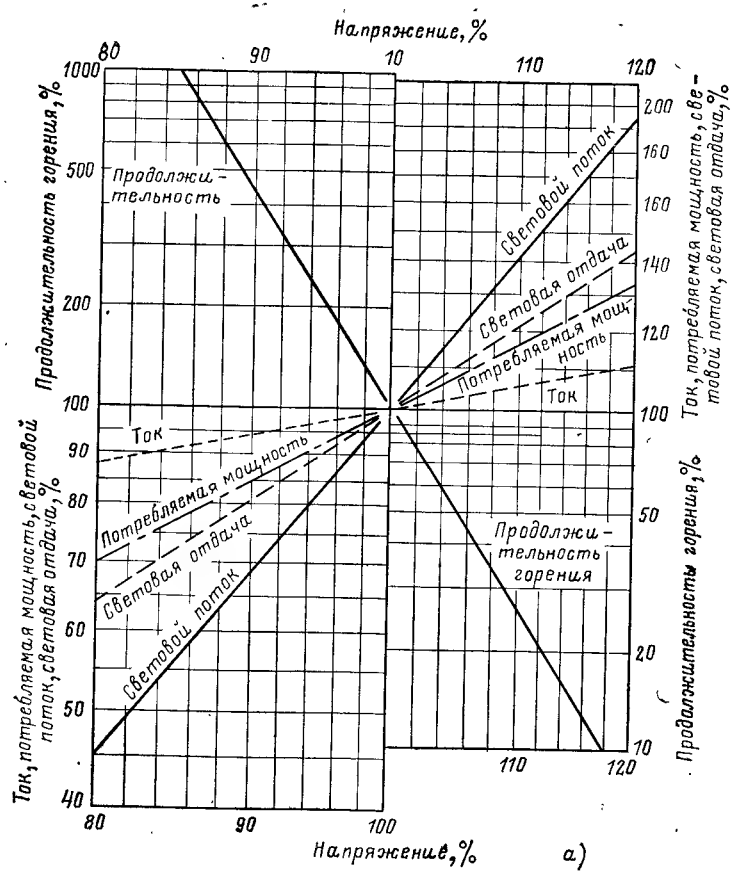
Анализ достоинств и недостатков ламп накаливания приводит к следующим выводам: 1) необходимо определять экономически и технически обоснованные сферы применения тепловых и газоразрядных источников света; 2) использовать имеющиеся большие резервы дальнейшего совершенствования ламп накаливания; 3) обеспечивать правильную эксплуатацию ламп.

Ниже приводятся основные правила эксплуатации ламп накаливания. Прежде всего, лампы следует использовать для тех целей и в тех световых приборах, для которых они предназначены. Лишь в этом случае может быть обеспечена надежная работа как лампы, так и прибора в целом и их проектная световая эффективность. Поэтому на каждом светильнике, или в паспорте на него указываются максимально допустимая мощность применяемой лампы, ее тип и другие данные. Правильному применению ламп помогает система их условных обозначений (§ 1.1).

Из уравнений (5.10) и рисунков 5.21, 5.22 следует, что необходимым и наиболее важным условием нормальной эксплуатации ламп накаливания является полное соответствие напряжения, указанного на лампе, напряжению сети. В связи с наличием повышенного напряжения в электрических сетях разработаны и выпускаются лампы накаливания общего назначения на повышенное напряжение (против номинального напряжения сети). С другой стороны, стремятся по возможности разделить питание силовых и осветительных установок, ввести в осветительные сети стабилизаторы и ограничители напряжения. Расчеты по формулам, приведенным в § 10.3, показывают, что при стабильном напряжении питания в ряде случаев было бы целесообразно увеличить световую отдачу ламп накаливания общего назначения за счет некоторого снижения их срока службы; при этом снизились бы общие затраты на освещение. Однако использовать эту возможность пока не удается из-за нестабильности напряжения в сетях.

Для большинства ламп накаливания вредна повышенная влажность (возможны коррозия цоколя и отделение его от колбы), а также прямое попадание воды на колбу горящей лампы (возможно растрескивание колбы). Лампы нормального исполнения рассчитаны для работы при относительной влажности не более 98%. Брызгозащита ламп обеспечивается осветительной арматурой. Лампы нормального исполнения предназначены для работы в интервале температур от —60 до +50 °С и при внешнем давлении 730—1050 гПа (550—788 мм рт. ст.). Для ряда специальных ламп эти интервалы шире.

Лампы накаливания относятся к хрупким, электро- и пожароопасным изделиям и требуют соответствующего обращения (§ 3.2). Следует иметь в виду, что изменение положения работающей лампы в про-



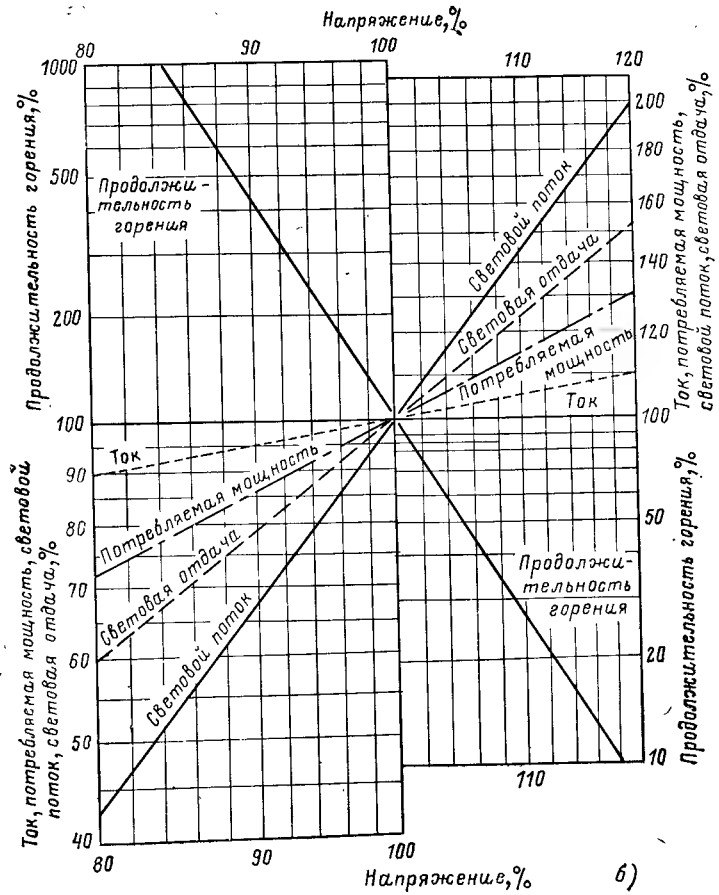


Рис. 5.22. Зависимость параметров вакуумных (*а*) и газополных (*б*) ламп от напряжения питания

странстве может существенно изменить температуру цоколя и ее распределение по поверхности колбы; температура цоколя и колбы зависит также от времени горения лампы (§ 9.3).

Глава шестая

ВЫБОР ГАЗА ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ. ГАЗОПОГЛОТИТЕЛИ

6.1. НАЗНАЧЕНИЕ И РОЛЬ НАПОЛНЯЮЩЕГО ГАЗА В ЛАМПАХ НАКАЛИВАНИЯ

Под влиянием высокой температуры материал тела накала испаряется (распыляется). Нить тела накала становится все тоньше, электрическое сопротивление ее увеличивается, а излучение света уменьшается как из-за снижения температуры тела накала, так и в связи с потемнением колбы вследствие оседания на ней частиц испарившегося вольфрама. В конце концов спираль разрушается (перегорает) в наиболее тонком месте, с которого испарилось наибольшее количество вольфрама. Относительная потеря массы тела накала, при которой оно перегорело, называется критической потерей массы $q_{кр}$ и выражается в процентах:

$$q_{кр} = (G_0 - G_т)/G_0, \qquad (6.1)$$

где G_0 — начальная масса тела накала, а $G_т$ — масса перегоревшего тела накала. Обычно говорят о критической

потере массы не одного тела накала, а их совокупности. При этом в (6.1) приводятся средние значения величин.

Процесс распыления тела накала определяется рядом факторов, и на самом деле гораздо сложнее, чем здесь описано. Однако при прочих равных условиях всегда справедливо утверждение: чем меньше скорость испарения вольфрама, тем больше продолжительность горения лампы. Поэтому одной из главных задач конструктора является создать условия, обеспечивающие наименьшую скорость испарения материала тела накала в лампе.

Этого можно достигнуть, например, подбором соответствующего материала для спирали, однако, как мы увидим позже, резервы здесь хотя и имеются, но весьма ограниченны. Другой путь — создать внутри лампы (вокруг тела накала) такую среду, которая препятствовала бы испарению вольфрама. Такой средой обычно являются газы или их смеси, находящиеся при каком-то давлении. Характеристики наполняющих газов, их процентное содержание и давление — важнейшие параметры среды, окружающей тело накала в лампе.

В вакуумной лампе атомы вольфрама, отрываясь от поверхности тела накала, не встречают никаких препятствий и поэтому двигаются в пространстве по прямым линиям. Достигая поверхности колбы, они образуют на ней темный, относительно равномерный осадок. В газополной лампе тело накала окружено инертным газом или смесью газов, находящихся при определенном давлении. Молекулы инертного газа препятствуют диффузии испарившихся атомов вольфрама и отбрасывают часть «оторвавшихся» атомов обратно на спираль. В связи с этим испарение тела накала в газополной лампе идет медленнее и потемнение колб менее выражено, чем в вакуумной лампе. В уменьшении скорости испарения материала тела накала и состоит основное назначение наполняющего лампу газа.

Скорость испарения вольфрама с поверхности прямолинейной вольфрамовой нити в вакууме при температуре T определяется соотношением

$$m_T = M/St, \tag{6.2}$$

где M — масса вольфрама, испарившегося за время t; S — площадь поверхности, с которой идет испарение.

Если скорость испарения вольфрама в вакууме m_T, а в газе — m'_T, то

$$m'_T = m_T - m''_T, \tag{6.3}$$

где m''_T — скорость возвращения испарившегося вольфрама на нить. Равенство (6.3) показывает преимущество га-

зополных ламп по сравнению с вакуумными, выражающееся в меньшей скорости испарения вольфрама и позволяющее на этой основе получить более высокие параметры ламп.

Однако газ в лампе играет не только положительную, но и отрицательную роль. При горении газополных ламп в газовой среде, окружающей тело накала, имеют место явления теплопроводности и конвекции. Теплопро-

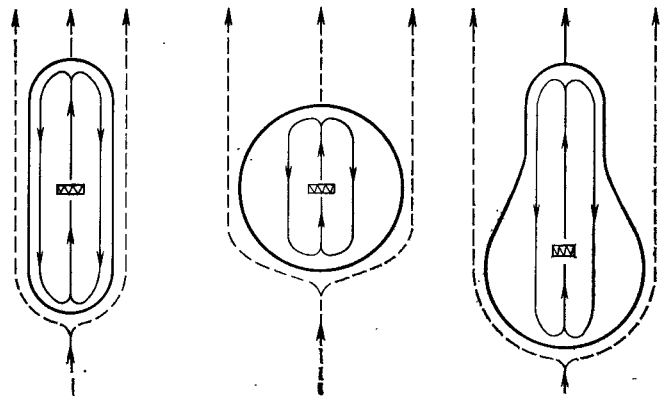


Рис. 6.1. Примерная схема конвекционных потоков в лампе с различными колбами (прямоугольник в центре — тело накала; пунктиром показаны тепловые потоки вне лампы)

водность обусловлена разностью температур тела накала и газа и способностью газовых молекул передавать друг другу при соударениях теплоту. Результат теплопроводности — передача теплоты от тела накала к внешней границе окружающего его так называемого стационарного (застойного) слоя и далее к колбе. Конвекция представляет собой направленное перемещение в разной степени нагретого газа под влиянием силы тяжести. Примерная схема конвекционных потоков в лампе показана на рис. 6.1. Конвекционные потоки увлекают с собой часть оторвавшихся от тела накала атомов вольфрама преимущественно вверх, что обусловливает неравномерное потемнение колб газополных ламп. Наличие процессов теплопроводности и конвекции газов в газополных лампах приводит к тому, что температура колб у них выше (при прочих равных условиях), чем у вакуумных, где действует только нагрев излучением; другим получается и распределение температуры по поверхности колб (рис. 6.2). У вакуумных ламп различные участки колбы нагреваются тем сильнее, чем бли-

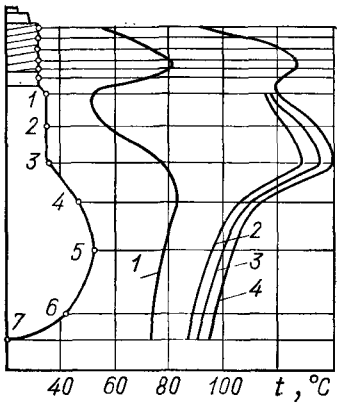


Рис. 6.2. Температура колбы и цоколя вакуумного и газополного вариантов лампы 100 Вт, 220 В при одинаковой температуре тела накала:

1 — вакуум; *2*, *3* и *4* — технический аргон при давлениях 500, 640 и 800 гПа соответственно (380, 400 и 500 мм рт. ст.)

же они к телу накала, а у газополных степень нагрева отдельных участков колбы зависит еще от теплопроводности и конвекции газов.

Наполняющий лампу газ отводит часть теплоты от тела накала, увеличивая тем самым потери энергии в лампе. Потери энергии, вызванные теплопроводностью и конвекцией, носят название тепловых потерь или потерь мощности через газ и обозначаются $P_г$. Для оценки таких потерь вводят понятие относительных тепловых потерь через газ: $K = P_г / P$, где P — мощность лампы. Значение $P_г$ можно определить экспериментально как разницу потребляемых данной лампой мощностей при наличии в ней газового наполнения ($P_{л,г}$) и без него ($P_{л,в}$) при одинаковой температуре тела накала:

$$P_г = P_{л,г} - P_{л,в}. \qquad (6.4)$$

Поскольку при этом используется одно и то же тело накала, то равенство его температуры в вакуумном и газополном исполнении лампы может быть установлено по равенству световых потоков.

Отличие друг от друга вакуумных и газополных ламп наглядно представляется уравнением баланса мощностей. Для газополной лампы баланс мощности имеет следующий вид:

$$P_{л,г} = \Phi_{eг} + P_д + P_г, \qquad (6.5)$$

где $P_{л.г}$ — подводимая к лампе мощность; $\Phi_{eг}$ — поток излучения тела накала; $P_д$ — мощность, отводимая держателями (поддержки и электроды). Для вакуумных ламп потери через газ $P_г \approx 0$, поэтому

$$P_{л,в} = \Phi_{eв} + P_д. \qquad (6.6)$$

Из (6.5) и (6.6) легко получить вывод, что при одинаковых температуре, размерах и форме тела накала световая отдача газополной лампы $\eta_{Vг}$ будет меньше, чем вакуумной $\eta_{Vв}$:

$$\eta_{Vг} = \frac{\eta_{Vв}}{1 + \dfrac{P_г}{\Phi_{eг} + P_д}}. \qquad (6.7)$$

Из (6.7) следует, что для повышения световой отдачи газополной лампы нужно поднять температуру тела накала до значения выше того, которое оно имело в вакууме, и снизить потери мощности через газ. Последнее может быть достигнуто в основном двумя приемами: обеспечением максимальной компактности тела накала, иначе говоря, уменьшением площади поверхности соприкосновения тела накала со средой лампы (гл. 7), и выбором для наполнения лампы такого состава и давления газов, которое обеспечило бы наименьшую теплопроводность среды. Из сказанного ясно, что вопрос о том, делать ли какую-нибудь новую лампу вакуумной или газополной, должен решаться комплексно. Учитывая назначение лампы, необходимо оценивать различные варианты тела накала, состава и давления окружающей среды и другие факторы. В общем виде условие целесообразности наполнения лампы накаливания общего назначения газом можно сформулировать так: при неизменном сроке службы световая отдача лампы с газом должна быть выше световой отдачи лампы без газового наполнения.

В распоряжении конструкторов ламп в настоящее время имеется большое количество конструктивно-технологических приемов, а также экспериментальных и математических зависимостей и данных, позволяющих найти правильное решение при выборе среды, окружающей тело накала. Задача при этом заключается в том, чтобы максимально полно реализовать основное назначение наполняющего лампу газа и свести к минимуму его отрицательную роль.

6.2. ВЫБОР ГАЗОВ ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Исходя из назначения и роли наполняющих лампу накаливания газов можно сформулировать основные требования к ним. Первое обязательное требование — газ не должен вступать в химические соединения с материалом тела накала и другими внутренними деталями лампы как в нерабочем состоянии лампы, так и во время ее горения. Таким свойством обладают инертные газы аргон, криптон, ксенон, а также азот и их смеси. В табл. 6.1 приведены основные свойства некоторых инертных газов и азота, применяемых для наполнения ламп накаливания.

Таблица 6.1

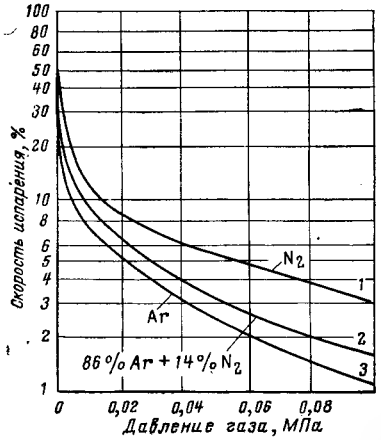
Название и обозначение газа	Объемное содержание в воздухе, %	Относительная плотность (плотность воздуха равна 1)	Плотность газа, кг/м³	Молекулярная масса	Температура кипения, К	Критическая температура, К	Теплопроводность при 273 К и 1013 гПа (760 мм рт.ст.*)·10⁻³ Вт/(м·К)	Потенциал ионизации, эВ
Азот N_2	78,09	0,97	1,25	28	77,4	126,0	2,38	15,8
Аргон Ar	0,93	1,38	1,78	40	87,2	153,2	1,63	15,69
Криптон Kr	0,00011	0,89	3,71	84	120,2	210,6	0,88	13,94
Ксенон Xe	0,00001	4,51	5,84	131	164,2	289,8	0,50	12,08

*1 мм рт.ст.=133,322 Па. Паскаль (Па)—это давление, вызванное силой в 1 ньютон (Н), равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м².

Промышленное получение газов, указанных в табл. 6.1, осуществляют из атмосферного воздуха путем выполнения двух основных операций: 1) сжижения воздуха посредством глубокого охлаждения; 2) разделения жидкого воздуха на составные части, основанного на различии температур кипения и испарения газов, входящих в состав воздуха. Чем меньше объемное содержание газа в воздухе, тем труднее извлекать этот газ и тем дороже он стоит. Стоимость газа — немаловажный фактор, и его приходится учитывать при выборе наполняющих газов.

Чем больше молекулярная масса газа (чем «тяжелее» газ), тем в большей степени он замедляет испарение вольфрама (рис. 6.3) [1]. При прочих равных условиях скорость испарения в азоте составляет 2—5 %, а в аргоне—1,3—2 % скорости испарения в вакууме; если принять скорость испарения в аргоне за 100 %, то в криптоне она составит 61 % и в ксеноне 41 %. Выбор газов с большей молекулярной массой предпочтительнее также с точки зрения сокращения тепловых потерь через газ. С ростом молекулярной массы газов снижается их теплопроводность и соответственно уменьшаются тепловые потери (рис. 6.4) [1]. Если принять теплопроводность аргона за 100 %, то у криптона она составит 54 %, а у ксенона 32 %. В связи с изложенным совершенствование газополных ламп шло по линии применения все более «тяжелых» газов (от азота к аргону, а затем к криптону и ксенону). В настоящее время азот применяется преимущественно лишь в качестве добавки к другим газам-наполнителям для предотвращения

возникновения в лампе электрического пробоя через газ, а ксенон из-за высокой стоимости используется только для наполнения некоторых специальных ламп. Применение в лампах криптона и ксенона, имеющих малую теплопроводность, позволяет значительно уменьшить размеры ламп, при этом сохранив прежними температуру колбы и цоколя и обеспечив экономию дорогостоящих газов. Колбам криптоновых ламп придают форму грибка (см. рис. 5.13,*б*), что позволяет разместить тело накала на достаточном удалении от стекла колбы.



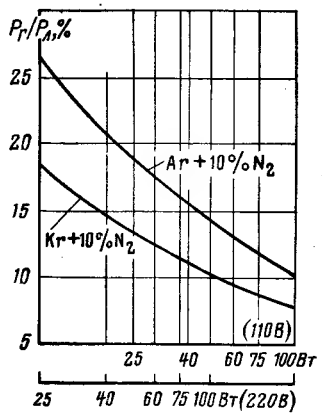


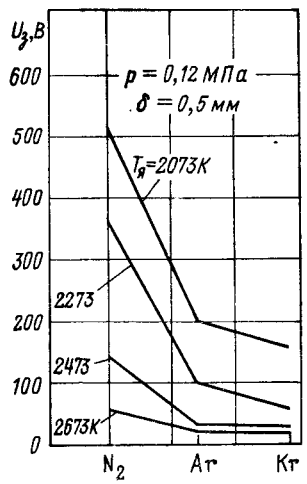
Рис. 6.3. Влияние рода и давления наполняющего газа на скорость испарения вольфрамовой нити:
1—3 — диаметр нити d=0,075 мм; T=2400 К; *2* — d=0,1 мм; T=2870 К

Рис. 6.4. Относительные тепловые потери через газ для биспиральных ламп разной мощности при давлении газа в лампе p=800 гПа (600 мм рт. ст.)

Приложенное к телу накала напряжение создает электрическое поле, а раскаленное тело накала эмитирует электроны. Ускоренные электрическим полем, они могут ионизировать атомы газа, что может привести к возникновению электрического разряда между концами тела накала. Опыт эксплуатации ламп и многочисленные эксперименты говорят о том, что вследствие падающей вольт-амперной характеристики этого разряда ток его возрастает и в конечном итоге тело накала перегорает и оплавляются вводы, а иногда растрескиваются ножка и колба. Поэтому к наполняющим лампу газам предъявляется еще одно требование: они должны иметь достаточно высокий потенциал

ионизации для того, чтобы напряжение зажигания разряда в лампе $U_з$ превышало максимально возможные значения напряжения на лампе. Значение $U_з$ можно легко проверить путем постепенного повышения напряжения на лампе до возникновения разряда.

К сожалению, как видно из табл. 6.1 и рис. 6.5 [1], указанному требованию в меньшей степени удовлетворяют аргон, криптон и ксенон — именно те газы, которые, как



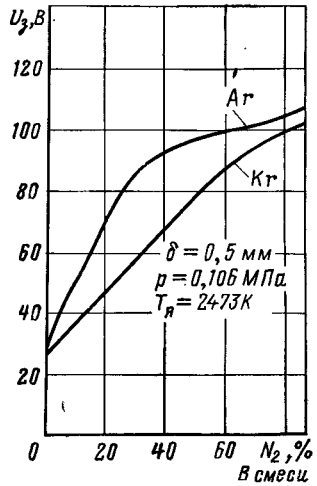


Рис. 6.5. Зависимость напряжения зажигания разряда между вольфрамовыми нитями от рода наполняющего газа (p — давление газа; δ — расстояние между нитями; $T_я$ — яркостная температура нити)

Рис. 6.6. Зависимость напряжения зажигания разряда между вольфрамовыми нитями от содержания азота в наполняющей лампу газовой смеси (p — давление газа; δ — расстояние между нитями; $T_я$ — яркостная температура нити)

отмечалось выше, предпочтительны для ламп накаливания по световой отдаче и сроку службы. В связи с этим лампы, как правило (особенно на напряжение выше 36 В), не наполняют чистым аргоном, криптоном и ксеноном. Для уменьшения опасности возникновения разряда в лампе к указанным газам добавляют небольшое количество азота, который повышает напряжение зажигания разряда $U_з$ (рис. 6.6). Однако легкий и теплопроводный азот увеличивает тепловые потери, поэтому добавка азота должна быть минимальной. Чем меньше рабочее напряжение и температура тела накала, тем меньшее количество азота следует вводить в лампу. Например, для биспиральных

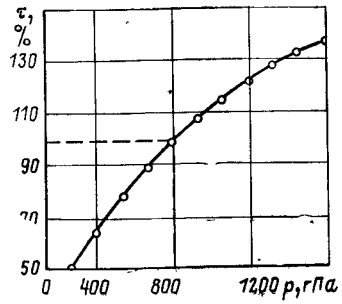
ламп на 127 В добавка азота должна быть 6 — 8 %, в лампах на 220 В — 10 — 12 %. Некоторые лампы на 127 и 220 В, имеющие компактное тело накала и высокую яркость, наполняют чистым азотом. Для специальных низковольтных ламп накаливания принято применять следующие дозировки азота в зависимости от напряжения лампы: до 0,3 % (при напряжении до 8 В), 1,5 — 2,5 % (при 8—16 В), 4 — 6 % (при 16 — 36 В).

Для уменьшения скорости испарения вольфрама и сведения к минимуму тепловых потерь лампы накаливания общего назначения мощностью 25 Вт и менее с телом накала из тонкой вольфрамовой нити диаметром менее 0,03—0,04 мм принято изготавливать вакуумными, а лампы более мощные, с более толстой вольфрамовой нитью — газонолными.

6.3. ВЫБОР ДАВЛЕНИЯ НАПОЛНЯЮЩЕГО ГАЗА

В § 6.2 речь шла о принципах выбора газов или их смесей для наполнения ламп исходя из того, что давление газов остается для всех вариантов неизменным (заданным). Однако давление наполняющих газов существенно влияет на скорость испарения вольфрама m'_T, критическую потерю массы тела накала $q_{кр}$, потерю мощности через газ $P_г$, а значит и на световую отдачу ламп η_V и их срок службы τ. Поэтому при разработке ламп накаливания важно не только выбрать состав окружающей тело накала газовой смеси, но и оптимальное давление ее.

При решении этой задачи необходимо исходить прежде всего из уже установленных многочисленных расчет-



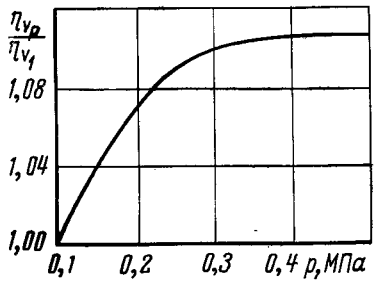


Рис. 6.7. Зависимость срока службы лампы от давления наполняющего газа

Рис. 6.8. Изменение световой отдачи ламп Г125-135-500 в зависимости от давления наполняющей газовой смеси (при неизменном сроке службы, равном 1000 ч)

ных и экспериментальных зависимостей. Так, из рис. 6.3 видно, что при любых газах скорость испарения вольфрама снижается с увеличением давления в лампе, причем эта зависимость наиболее ярко выражена в области относительно малых давлений, лежащих в пределах до 200 гПа (150 мм рт. ст.). Понятно, что замедление испарения вольфрама при увеличении давления газа сопровождается повышением срока службы ламп (при неизменной световой отдаче). На рис. 6.7 показана зависимость срока службы ламп от давления наполняющего газа, измеренная при комнатной температуре. За 100 % принят срок службы при давлении наполняющего газа 800 гПа (600 мм рт. ст.). Из рисунка видно, что при увеличении давления в экспериментальной лампе с 800 до 1600 гПа (600—1200 мм рт. ст) срок службы ее повысился на 40 % при той же световой отдаче.

Однако повышение давления в лампах не всегда возможно и не всегда целесообразно. Прежде всего приходится считаться с технологическими ограничениями. Так, у лампы, наполненной до давления выше атмосферного, при принятой технологии невозможно отпаять штенгель и герметизировать лампу, поскольку штенгель, будучи разогретым до размягчения, не сплющивается, а раздувается и прорывается. Предложен ряд способов отпайки ламп при давлении газа в лампе выше атмосферного, но они существенно усложняют и удорожают технологию и поэтому не нашли большого распространения. При высоком внутреннем давлении появляется бо́льшая возможность разрыва колбы. Если в среднем колбы обладают значительным резервом по прочности и могут выдерживать внутреннее давление 2700—4000 гПа (2000—3000 мм рт. ст), то в отношении каждой колбы в силу их неоднородности по размерам этого сказать нельзя. Следует учитывать также, что если исходное давление в лампе составляет 800 гПа (600 мм рт. ст.), то при горении ее оно достигает 1150—1200 гПа (860—900 мм рт. ст.), т. е. превышает атмосферное. Возможности повышения давления в лампе ограничены также другим обстоятельством: с увеличением давления теплопроводность любого газа возрастает, в связи с чем растут тепловые потери через газ ($P_г$). Поэтому повышать давление газа в лампе целесообразно лишь до тех пор, пока отрицательные последствия этого (уменьшение прочности ламп и увеличение тепловых потерь через газ) с избытком компенсируются положительным эффектом (уменьшение скорости испарения вольфрама с тела накала).

Под оптимальным (наилучшим из возможных) давлением данной газовой смеси $p_{опт}$ следует понимать такое давление в работающей лампе, при котором обеспечивается максимальная световая отдача при заданном сроке службы $\tau = const$. (В принципе под $p_{опт}$ можно понимать и давление, при котором обеспечивается максимальный срок службы при $\eta_V = const$). Значение оптимального давления можно оценить путем анализа экспериментально получаемых зависимостей световой отдачи от давления в лампе при неизменном сроке службы. На рис. 6.8 показана такая зависимость для лампы Г125-135-500, наполненной смесью 86% Ar+ +14% N_2. Из рисунка следует, что оптимальное давление лежит в области до 3000 гПа (2255 мм рт. ст.).

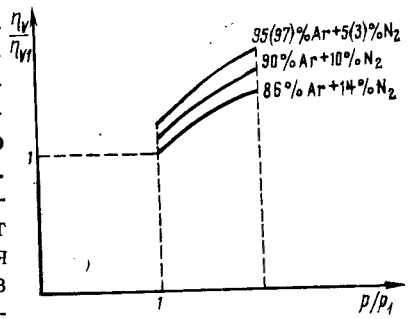


Рис. 6.9. Зависимость световой отдачи ламп от давления и состава аргоно-азотной смеси

С увеличением давления газовой смеси растет напряжение зажигания электрического разряда в лампе. Это весьма положительный факт, который позволяет несколько снизить содержание азота в смеси и без ухудшения электрической прочности ламп повысить световую отдачу. На рис. 6.9 показана качественная зависимость между световой отдачей и давлением аргоно-азотной смеси с разным содержанием азота (η_{V1} и p_1 — исходные световая отдача и давление; η_V и p — новые значения этих величин [1]. При выборе давления наполняющего газа необходимо учитывать условия эксплуатации тех или иных ламп. Лампы, предназначенные для работы в напряженном тепловом режиме, например в герметизированных светильниках, а также лампы, имеющие тяжелый электрический режим, не следует наполнять до давлений, превышающих атмосферное. Нарушение этого правила может вызвать недопустимый перегрев колбы.

Проблема давления в лампе важна не только для газополных, но и для вакуумных ламп. Для нормального функционирования большинства типов вакуумных ламп накаливания общего назначения необходимо в них создать разрежение порядка 10^{-2}—10^{-3} Па (10^{-4}—10^{-5} мм рт. ст.). При откачке ламп насосами получают разрежение до 2,5—4 Па (2—3·10^{-2} мм рт. ст.); более глубокое

разрежение до 10^{-2}—10^{-3} Па (10^{-4}—10^{-5} мм рт. ст.) достигается за счет вводимых в лампу специальных веществ — газопоглотителей.

Выбор состава и давления наполняющей лампу газовой смеси — задача многофакторная, сложная. К сожалению, пока еще отсутствуют достаточно универсальные и достоверные аналитические зависимости, которые позволили бы расчетным путем быстро и точно определить оптимальный состав и давление смеси по заданным для новой разработки параметрам лампы, хотя в разработке методов такого расчета имеются успехи [1]. Отдельные вышеприведенные качественные, а также количественные зависимости, полученные расчетом и из эксперимента, позволяют конструктору успешно принимать решение о том, делать ли новую лампу вакуумной или газополной, какой газовой смесью и до какого давления ее наполнять.

6.4. ГАЗОПОГЛОТИТЕЛИ

Всякое твердое тело способно поглощать (адсорбировать и абсорбировать) значительные объемы газа, иногда во много раз превышающие его собственный объем. Поглощенный телом газ сжимается и уплотняется в нем. Газы поглощаются тем больше, чем выше их давление и ниже температура. При откачке газа и нагреве тела оно начинает выделять поглощенные газы. Колба и внутренние детали лампы во время термической технологической обработки и особенно при нагреве во время работы лампы также выделяют различные газы и пары (вольфрамовая спираль и молибденовые поддержки — преимущественно кислород, никелевые электроды — водород и окись углерода, стекло — пары воды). Кроме того, при откачке и наполнении в лампу могут проникать пары масла из откачной системы.

Большинство указанных примесей отрицательно сказывается на работе лампы. Кислород активно взаимодействует с работающим телом накала, образуя быстро испаряющиеся и оседающие на колбе и ножке окиси вольфрама. Углерод и углеродосодержащие вещества при высокой температуре реагируют с раскаленным телом накала, образуя карбид, приводящий к хрупкости и короблению спирали, к увеличению ее электрического сопротивления. Наличие паров воды вызывает непрерывную и интенсивно протекающую круговую реакцию в лампе — «водяной цикл»: $3H_2O + W \rightleftarrows WO_3 + 6H$. Вольфрамовый ангидрид WO_3 как летучее вещество испаряется с тела накала и

конденсируется на колбе. Здесь водород восстанавливает его до металла, а образующийся водяной пар вновь взаимодействует с телом накала, быстро разрушая его.

Для борьбы с вредными газами и парами, неизбежно попадающими внутрь колбы, в лампу вводят специально подобранные *газопоглотители* (геттеры) — материалы, которые активно и необратимо поглощают или связывают определенные избыточные или вредные для работы лампы пары и газы и очищают тем самым окружающую тело накала среду.

В газополных лампах газопоглотители призваны поглощать вредные газы и пары, занесенные в лампы при их изготовлении и выделяющиеся из деталей ламп во время их работы. В вакуумных лампах внутренние детали ламп нагреваются меньше, чем в газополных, и меньше выделяют поглощенные газы. Поэтому основное назначение газопоглотителей в вакуумных лампах — повысить степень разрежения, созданного при откачке ламп насосами, и поддерживать его на требуемом уровне в процессе горения ламп.

В эффективных газопоглотителях нуждаются прежде всего лампы малого объема, содержащие внутри колбы относительно большую массу металлических деталей. Совершенно обязательно применение газопоглотителей при изготовлении малогабаритных ламп с высокой температурой тела накала, имеющих никелевые вводы и вольфрамовую нить достаточно большого диаметра (самолетные лампы, автомобильные, кинопроекционные и т. д.).

Газопоглотители характеризуются следующими основными параметрами: 1) *скорость* поглощения; она максимальна у обезгаженного газопоглотителя и убывает по мере поглощения им газов; при этом она должна быть больше или, по крайней мере, равна скорости выделения газов деталями лампы, так как в противном случае давление вредных газов в лампе может непрерывно возрастать; 2) *емкость* газопоглотителя, т. е. количество газов, которое он может поглотить; обычно емкостью газопоглотителя считают то количество поглощенного газа, которое приводит к уменьшению скорости поглощения в 10 раз; 3) *избирательность* сорбционной способности газопоглотителя, т. е. степень активности его к различным газам; 4) *предельный вакуум,* обеспечиваемый газопоглотителем; значение этого параметра можно оценить экспериментально, сопоставляя давление в каком-либо вакуумном объеме до и после распыления газопоглотителя. При выборе

газопоглотителя необходимо добиваться, чтобы значения перечисленных параметров были сопоставимы (согласованы) с предполагаемым составом и количеством вредных газов и паров в лампе; последние поддаются примерным оценкам.

Газопоглотители для ламп накаливания должны удовлетворять еще ряду требований: не создавать темных светопоглощающих налетов на колбе; содержать при введении в лампу минимальное количество газов, которые должны быть безвредными для деталей лампы и особенно для тела накала; не вступать в химическое взаимодействие с материалами внутренних деталей лампы; иметь в рабочем режиме низкое давление паров; выдерживать термообработку, принятую для лампы накаливания, без распыления или других вредных изменений; быть достаточно механически прочным, чтобы не разрушаться и не осыпаться при вибрационных и ударных нагрузках в процессе изготовления и эксплуатации ламп; не изменять своих свойств при хранении на воздухе, быть достаточно влагостойким и химически устойчивым.

Газопоглотители для ламп накаливания можно разделить на две группы: 1) испаряющиеся — красный фосфор, газовая сажа, углекислый барий или их смеси; 2) неиспаряющиеся—металлические цирконий, титан, алюминий и др. Те и другие газопоглотители могут применяться в отдельности или в сочетании друг с другом. В табл. 6.2 приведены некоторые свойства основных газопоглотителей для ламп накаливания [11]. Для испаряющихся газопоглощающих материалов (красный фосфор, углекислый барий) указаны температуры их испарения. Эти материалы сами непосредственно не поглощают газы, поглотителями являются оседающие на колбе химические соединения (фосфорный ангидрид, желтый фосфор, окись бария и др.), поглощающие газы при рабочей температуре колбы. Для неиспаряющихся газопоглотителей (металлические цирконий, титан, алюминий), которые поглощают газы непосредственно сами, в таблице указаны их рабочие температуры.

Таблица 6.2

Наименование газопоглотителя	Плотность, кг/м³	Температура испарения (И) и рабочая (Р), °С	Какие газы преимущественно поглощает
Красный фосфор Р. Порошок темно-красного цвета	2300	416(И)	Кислород, пары воды
Газовая сажа С. Тончайший черный порошок почти чистого углерода	1900—2000	Более 300 (Р)	Кислород
Углекислый барий $BaCO_3$. Порошок белого цвета	4300	800(И)	Кислород, пары воды, все химически активные газы. Слабо поглощает углеводороды
Цирконий металлический Zr. Порошок темно-серого цвета	6500	300—400 и 700—800(Р)	При 300—400°С поглощает водород, при 700—800°С—кислород и большинство других газов
Титан металлический Ti. Порошок темно-серого цвета	4500	200—800 (Р)	Разные газы, пары воды, особенно водород при 200—250°С
Алюминий металлический Al. Пудра серого цвета	2700	660—800 (Р)	Кислород свободный и связанный в парах воды

Указанные в табл. 6.2 газопоглощающие материалы невозможно непосредственно нанести на внутренние детали ламп, так как они являются сухими порошками. Поэтому газопоглотители вводят в лампы в виде заранее подготовленных *суспензий*. Последние изготавливаются из собственно газопоглощающих материалов и связующих веществ (биндеров), служащих средой, в которой распределяются частицы газопоглотителя. В качестве связующего вещества применяют обычно нитролак (коллоидный раствор нитроклетчатки в амилацетате), а в некоторых случаях — спирт этиловый (ректификат). Рецепты суспензий постоянно совершенствуются, уточняются при изменении конструкции лампы, а иногда даже в зависимости от времени года в связи с изменением влажности воздуха. По ряду причин может изменяться и *привес* газопоглотителя, под которым понимают выраженное в процентах отношение массы спирали с газопоглотителем к массе спирали без него.

В настоящее время достаточно четко определены области применения отдельных газопоглотителей. Механизм поглощения газов газопоглотителями до сих пор еще не вполне изучен. В общем виде его можно представить так: химически активные газы либо образуют с газопоглотителями химические соединения (окислы, нитриды, гидриды, карбиды), либо растворяются в толще газопоглотителя.

Фосфорно-криолитовый газопоглотитель используют в вакуумных лампах общего назначения, его наносят непосредственно на спираль. При первом зажигании готовой лампы красный фосфор возгоняется в пар и покидает тело накала. Часть паров взаимодействует с остат-

ками кислорода в лампе и образует сухой фосфорный ангидрид, который химически соединяется с остаточными парами воды в прозрачную фосфорную кислоту и оседает на внутренней поверхности колбы. Другая часть паров фосфора сорбирует остаточные газы из объема лампы и конденсируется на холодных стенках колбы, превращаясь в очень активный, обладающий высокой сорбционной способностью желтый фосфор. Криолит $3NaF \cdot AlF_3$ испаряется с тела накала при 1000°С и оседает на стенках колбы. При работе лампы он взаимодействует с распыленным вольфрамом, связывает часть его, образуя почти прозрачное фтористое соединение, и уменьшает тем самым потемнение колбы.

Высокая активность красного фосфора в вакуумных лампах накаливания общего назначения поддерживается термоэмиссией электронов и процессами ионизации остаточных газов в лампах. В вакуумных низковольтных лампах (ниже 6 В) эти процессы менее заметны, поэтому газопоглотитель в них не вводят. В миниатюрных и сверхминиатюрных вакуумных лампах не применяют газопоглотитель также и потому, что он сгорел бы в процессе заварки.

Сам вольфрам во время работы вакуумной лампы служит газопоглотителем. Атомы вольфрама испаряются с раскаленной поверхности тела накала и «прибивают» молекулы остаточных газов к стенке колбы. Чем дольше горит вакуумная лампа, тем выше в ней становится вакуум. Это явление позволяет выпускать низковольтные лампы без газопоглотителя.

Действие *фосфорного газопоглотителя* в газополных лампах общего назначения на 50—250 В, также наносимого на спираль, дает меньший эффект, чем в вакуумных, из-за недостаточного уровня ионизации среды.

Бариевый газопоглотитель (иногда с добавкой сажи) используется в основном в специальных маломощных газополных лампах на напряжение 6—12 В (автомобильных, самолетных и других с повышенными требованиями к механической прочности тела накала). При первом зажигании ламп на откачном автомате (до откачки лампы) углекислый барий испаряется и в объеме лампы происходят реакции

$$BaCO_3 = BaO + CO_2 \text{ и } BaO + C = Ba + CO.$$

Окись и двуокись углерода откачиваются насосами, а окись бария и металлический барий, осев на стенках колбы (и оставаясь там после отпайки лампы), жадно поглощают водяной пар и свободный кислород.

Циркониевый газопоглотитель применяется, как и бариевый, в специальных газополных лампах. Он наносится на никелевые вводы вблизи места зажима спирали или на поддержки с таким расчетом, чтобы обеспечить ему необходимые температурные условия. Циркониевый газопоглотитель не испаряется в пространстве лампы, а остается на вводах в течение всего времени работы, химически взаимодействуя со свободным и связанным кислородом (при 700—800°С) и активно

сорбируя водород (при 300—400°С), прерывая круговую реакцию «водяного цикла» (см. § 6.4) между парами воды и вольфрамом. Цирконий, расположенный ближе к телу накала, хорошо поглощает кислород, а удаленный от спирали — водород.

Алюминиевый газопоглотитель применяют в газополных мощных специальных лампах, размещая его на поверхности всего ввода или той его части, где имеется нужная для работы алюминиевого газопоглотителя температура. Алюминий используют также в газополных лампах накаливания общего назначения как дополнение к фосфорному газопоглотителю. В этом случае его наносят на молибденовую проволоку перед изготовлением из нее поддержек для этих ламп. При нагреве до 660—800°С окисная пленка на поверхности алюминия разрывается и через разрывы испаряется чистый алюминий, пары которого поглощают свободный кислород и связанный кислород из паров воды. Алюминиевый газопоглотитель применяют лишь в тех лампах, у которых температура вводов или поддержек во время работы превышает 660°С.

Исследования показали, что успех применения газопоглотителей зависит не только от них самих, но и от условий, созданных для нормального функционирования газопоглотителей в лампе (способа введения газопоглотителя в лампу, места его расположения, температурных и других условий распыления и т. п.).

Глава седьмая

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ТЕЛА НАКАЛА ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

7.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ТЕЛУ НАКАЛА

Назначение тела накала и предъявляемые к нему требования. Тело накала представляет собой главную часть лампы. Оно собственно и является источником света. Все остальные детали лампы служат для того, чтобы обеспечить телу накала необходимые условия для нормальной работы. Требования, предъявляемые к телу накала, можно условно разделить на физические и конструктивные. *Физические* требования относятся к материалу, из которого изготовлено тело накала. Этот материал должен иметь:

1) высокую температуру плавления; только при этом условии можно придать телу накала высокую температуру и получить приемлемые световой КПД, световую отдачу и срок службы;

2) малую скорость испарения; от этого зависит срок службы, степень загрязнения колб испарившимися частицами, стабильность светового потока в процессе горения ламп;

3) селективность (избирательность) излучения, при которой раскаленное тело накала излучало бы возможно большую долю энергии излучения в видимой области спектра, обеспечивая более высокую световую отдачу;

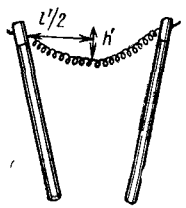


Рис. 7.1. Провисание тела накала

4) достаточную формоустойчивость при высокой рабочей температуре, т. е. способность сохранять заданную исходную форму и размеры в процессе горения лампы. Наиболее типичным отклонением от первоначальной формы является провисание тела накала при высокой температуре под влиянием собственного веса, что оценивается коэффициентом провисания $k_{пр}$, т. е. отношением стрелы прогиба h' к половине начальной длины l' участка тела накала, расположенного между двумя поддерживающими элементами $k_{пр}=2h'/l'$ (рис. 7.1);

5) устойчивость к механическим (вибрационным и ударным) нагрузкам в том диапазоне их значений, которые имеют место при транспортировке и эксплуатации ламп. При воздействии таких нагрузок тело накала не должно разрушаться, а также изменять свои размеры и форму сверх допустимых пределов.

Основное *конструктивное* требование для большинства ламп (за исключением некоторых специальных) заключается в том, чтобы тело накала имело как можно меньшие размеры, было компактным. При этом условии можно уменьшить размеры колб, а значит и расход наполняющих лампу газов, сократить размеры внутренних деталей ламп и количество держателей тела накала, снизить тепловые потери через газ в газополных лампах за счет уменьшения поверхности соприкосновения тела накала с газовой средой.

Повышение компактности тела накала достигается прежде всего переходом от прямой нити к спирали, биспирали и даже триспирали. При этом как бы уменьшается длина и увеличивается диаметр светящего тела, а значит уменьшается поверхность охлаждения тела накала. Свивание проволоки в спираль приводит к замедлению испарения материала, так как некоторая доля атомов, испаряющихся с внутренней поверхности спирали, встречает

на своем пути витки спирали и оседает на них. Переход на спирализованное тело накала облегчил его монтаж в лампе и позволил механизировать эту операцию. Для спирализованного тела накала характерны эффект *экранирования* излучения (часть излучения, испускаемого внутренней поверхностью спирали, поглощается самой спиралью, ослабляя общее излучение лампы) и эффект *почернения* излучения (после многократных отражений от витков спирали излучение, выходящее наружу, содержит меньше видимых лучей, чем при непосредственном излучении). Это объясняется меньшим коэффициентом отражения вольфрама в видимой области спектра по сравнению с ИК-областью (§ 5.1). В результате при одинаковой температуре спираль излучает меньше света, чем прямая нить. Однако спираль без ущерба может работать при более высокой температуре, чем нить, имея малые скорость испарения и долю потерь мощности через газ. Поэтому световая отдача у спирализованного тела накала выше, чем у нити.

Лампам с биспиральным телом накала свойственны некоторые недостатки: повышенная чувствительность к механическим нагрузкам; бо́льшая по сравнению с моноспиральными лампами склонность к перегоранию с явлением электрической дуги; повышенное провисание тела накала при рабочих температурах. Все это ограничивает применение биспиралей для ряда специальных ламп.

Компактность тела накала обеспечивается не только степенью спирализации нити, но и выбором рациональной формы тела накала. В форме должны разумно сочетаться технологичность и требования, диктуемые назначением лампы. Эти требования иногда бывают настолько важными, что приходится в той или иной мере отказываться даже от принципа максимальной компактности. Например, в лампах, испытывающих большие механические нагрузки, в ряде светоизмерительных и пирометрических ламп нередко отдают предпочтение прямой нити.

Кроме компактности к телу накала предъявляются и другие конструктивные требования, например, наличие конструктивных элементов, облегчающих монтаж тела накала на ножке лампы («тире»[1] на концах спирали и на участках крепления в держателях секционных тел накала); обязательное соответствие размеров и формы тела

[1] Тире называется неспирализованный участок спирали, на котором навиваемая проволока не обвивает керн, а укладывается почти параллельно ему.

накала полученным в результате расчетов и экспериментов (длина, диаметр, шаг спирали и биспирали и др.); отсутствие разного рода дефектов, обусловливаемых несоблюдением технологии при изготовлении ламп, и т. д.

Некоторые требования к материалу тела накала. Легко заметить, что выполнение большинства указанных выше физических и конструктивных требований к телу накала в решающей степени зависит от материала, выбранного для его изготовления. Проблема отыскания подходящего материала для тела накала возникла одновременно с рождением идеи создания теплового электрического источника света. За многие годы были обследованы с этой целью: платина (в том числе покрытая родием и иридием, рутением и осмием, молибденом, вольфрамом и хромом); уголь (стержень из ретортного угля; обугленные бамбуковые волокна, металлизованные бором, кремнием, мышьяком, сурьмой, торием, цирконием, марганцем, хромом, вольфрамом; угольные нити); углеродистые соединения титана, тория, урана, циркония, церия, тантала, вольфрама, ванадия; осмий; тантал; вольфрам.

В последние годы особое внимание привлекают карбиды металлов и особенно карбид тантала. Изучаются сплавы на основе вольфрама, особенно сплавы вольфрама с рением. Рассматривается возможность применения полупроводниковых материалов для тела накала ламп накаливания. Ведутся исследования по повышению качества и регулированию свойств вольфрамовой проволоки путем применения новых присадок и новых методов производства и контроля.

В настоящее время довольно полно сформулированы основные требования к материалу для тела накала, хотя многие из них еще не выражены количественно. Выбираемый материал должен обеспечивать выполнение указанных выше требований к телу накала (высокая температура плавления, малая скорость испарения, формоустойчивость при высоких температурах, устойчивость к механическим нагрузкам). Кроме того, он должен поддаваться механической обработке вплоть до получения тонких прочных нитей. Нити должны быть достаточно пластичными в холодном состоянии, поддаваться гибке, формовке, спирализации. В наибольшей степени отвечает этим требованиям металл вольфрам, который уже в течение ряда десятилетий является основным материалом тела накала и пока не имеет конкурентов. Основные свойства вольфрама излагались в § 2.1.

Изучая светотехнические и электрические параметры вольфрама при разных температурах, удалось установить следующую зависимость (справедливую для небольших изменений температуры):

$$A = C_A T^{n_A}, \qquad (7.1)$$

где A — какой-то параметр вольфрама (энергетическая светимость, яркость, световая отдача, скорость испарения в вакууме, удельное сопротивление и т. д.); C_A — постоянная, зависящая от рассматриваемого параметра вольфрама и температуры; n_A — показатель степени, принимающий различные значения для разных параметров вольфрама и температуры.

Значения n_A приводятся в таблицах физических параметров вольфрама, составленных для *идеальной* вольфрамовой нити. Под идеальной понимается нить, отвечающая следующим требованиям: 1) нить — строгий цилиндр с

Таблица 7.1. Физические параметры идеальной вольфрамовой нити

Температура тела накала T, К	Спектральный коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda, T)$		Средний коэффициент излучения в видимой части спектра $\varepsilon_в$	Интегральный коэффициент излучения ε_T	Яркостная температура $T_я$, К	Цветовая температура $T_ц$, К	Энергетическая температура $T_э$, К
	λ=665 нм	λ=467 нм					
1000	0,456	0,486	0,464	0,105	966	1006	562
1200	0,452	0,482	0,462	0,141	1149	1208	733
1400	0,448	0,478	0,459	0,175	1330	1412	907
1600	0,443	0,475	0,456	0,207	1508	1618	1083
1800	0,439	0,472	0,454	0,237	1684	1823	1259
2000	0,435	0,469	0,452	0,263	1857	2030	1434
2100	0,433	0,467	0,450	0,274	1943	2134	1521
2200	0,431	0,466	0,449	0,285	2027	2238	1608
2300	0,429	0,464	0,448	0,295	2111	2342	1695
2400	0,427	0,463	0,447	0,304	2192	2447	1782
2500	0,425	0,462	0,446	0,312	2275	2554	1868
2600	0,423	0,460	0,444	0,320	2356	2660	1955
2700	0,421	0,459	0,443	0,327	2437	2767	2042
2800	0,419	0,458	0,442	0,334	2515	2874	2128
2900	0,417	0,456	0,441	0,340	2595	2983	2214
3000	0,415	0,455	0,440	0,346	2674	3092	2300
3100	0,413	0,454	0,438	0,352	—	—	—
3200	0,411	0,452	0,437	0,357	2827	3312	2472
3300	0,409	0,451	0,436	0,362	—	—	—
3400	0,407	0,450	0,435	0,366	2978	3522	2643
3500	0,405	0,449	0,434	0,370	—	—	—
3650	0,402	0,447	0,433	0,376	3166	—	—

гладкой поверхностью, любое поперечное сечение которого имеет постоянный диаметр; 2) нить имеет строго прямолинейную форму; 3) нить имеет равную по длине температуру и постоянные по поверхности параметры излучения; 4) нить, изготовленная из химически чистого металла, однородна по структуре, рекристаллизована в высоком вакууме (нагрев при 2400 К в течение 24 ч); 5) удельное сопротивление постоянно по длине и зависит только от температуры вольфрама; 6) нить считается работающей в высоком вакууме и в колбе из стекла с известным и постоянным коэффициентом пропускания (и отражения) излучения. Данные об основных физических параметрах идеальной вольфрамовой нити приведены в табл. 7.1. и 7.2. Понятие «идеальная нить» и данные о ее характеристиках полезны для решения практических задач с конкретными лампами накаливания. При этом в расчеты, сделанные для идеализированного источника излучения, вводят соответствующие поправки (например, на охлаждающее действие вводов и поддержек и др.).

Таблица 7.2. Физические параметры идеальной вольфрамовой нити

Температура T, К	Удельное сопротивление		Энергетическая светимость		Яркость		Световая отдача		Скорость испарения в вакууме	
	$\rho_T \cdot 10^6$, Ом·см	n_ρ	M_{eT}, Вт/см²	n_M	L_T, ккд/м²	n_L	η_V, лм/Вт	n_{η_V}	m_T, г·см⁻²·с⁻¹	n_m
1000	24,93	1,20	0,602	5,65	0,0013	22,75	0,0007	17,3	$5,32 \cdot 10^{-34}$	94,8
1200	30,98	1,19	1,66	5,49	0,0631	19,90	0,013	14,2	$3,21 \cdot 10^{-27}$	80,6
1400	37,19	1,18	3,83	5,34	1,04	17,40	0,09	12,0	$2,51 \cdot 10^{-22}$	68,3
1600	43,55	1,18	7,74	5,20	9,27	15,47	0,399	10,3	$1,25 \cdot 10^{-18}$	59,3
1800	50,05	1,18	14,19	5,06	51,2	13,90	1,19	8,8	$8,80 \cdot 10^{-16}$	52,5
2000	56,67	1,19	24,04	4,93	206,6	12,57	2,86	7,6	$1,76 \cdot 10^{-13}$	47,2
2100	60,06	1,19	30,5	4,87	377,5	12,00	4,12	7,1	$1,66 \cdot 10^{-12}$	44,9
2200	63,48	1,19	38,2	4,81	640	11,48	5,6	6,7	$1,25 \cdot 10^{-11}$	42,9
2300	66,91	1,19	42,2	4,76	1037	11,00	7,3	6,2	$8,00 \cdot 10^{-11}$	40,9
2400	70,39	1,19	57,7	4,71	1644	10,55	9,53	5,8	$4,26 \cdot 10^{-10}$	39,0
2500	73,91	1,2	69,8	4,66	2480	10,13	11,82	5,5	$2,03 \cdot 10^{-9}$	37,3
2600	77,49	1,2	83,8	4,61	3640	9,75	14,4	5,1	$8,41 \cdot 10^{-9}$	35,8
2700	81,04	1,2	99,6	4,58	5320	9,39	17,8	4,8	$3,19 \cdot 10^{-8}$	34,3
2800	84,70	1,20	117,6	4,54	7320	9,06	20,7	4,5	$1,10 \cdot 10^{-7}$	32,9
2900	88,33	1,21	137,8	4,51	9870	8,74	23,9	4,2	$3,30 \cdot 10^{-7}$	31,6
3000	92,04	1,21	160,5	4,48	13 260	8,45	27,5	4,0	$9,95 \cdot 10^{-7}$	30,4
3200	99,54	1,22	214,0	4,43	22 520	7,94	35,0	3,5	$6,38 \cdot 10^{-6}$	28,2
3400	107,2	1,22	280,0	4,41	36 600	7,50	43,5	3,1	$3,47 \cdot 10^{-5}$	26,4
3600	115,0	1,23	360,0	4,39	55 300	7,14	51,2	2,8	$1,51 \cdot 10^{-4}$	24,8
3655	117,1	1,23	382,0	4,38	61 630	7,06	54,0	2,7	$2,28 \cdot 10^{-4}$	24,4

Отдельные свойства вольфрамовой проволоки можно изменить в нужном направлении с помощью так называемых *присадок* (окисей кремния SiO_2, алюминия Al_2O_3, тория ThO_2, калия K_2O, натрия Na_2O и других или их сочетаний), вводимых в вольфрам в процессе его изготовления в количестве нескольких десятых или сотых долей процента от массы чистого металла. Вольфрам марки

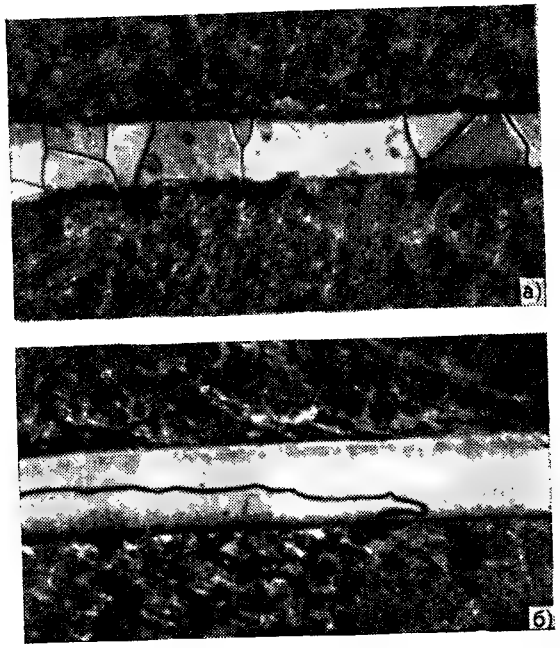


Рис. 7.2. Микроструктура вольфрамовой проволоки:
а — без присадки; *б* — с присадкой

ВА с кремниевой и алюминиевой присадками применяют для спиралей всех типов ламп накаливания с рабочей температурой тела накала до 3300 К, а также для катодов газоразрядных ламп. Указанная присадка придает вольфраму относительно большую механическую прочность и формоустойчивость. На рис. 7.2 показана микроструктура рекристаллизованной проволоки без присадки (*а*) и с алюминиевой и кремнийщелочной присадкой (*б*). Вольфрам ВМ с кремниевой и ториевой присадками применяется прежде всего для различного рода транспортных и

других ламп, от которых требуется повышенная устойчивость к вибрационным и ударным нагрузкам и тело накала которых работает при температуре до 2700 К. Ряд марок вольфрама с присадкой окиси тория (ВТ-7, ВТ-10, ВТ-15) используется только для катодов газоразрядных ламп. Торий придает вольфраму бо́льшую устойчивость к вибрациям и ударам, увеличивает эмиссионную способность, но приводит к сильному провисанию проволоки при высоких температурах. Поэтому вольфрам с присадкой окиси тория не пригоден для изготовления спиральных тел накала. Чистый вольфрам марки ВЧ используется для деталей ламп, работающих при сравнительно низких температурах, не требующих обработки при температуре выше 900 °С. Для вводов, держателей и других подобных деталей применяется вольфрам марки ВНР (разного назначения).

При высокой температуре вольфрам реагирует: с кислородом, образуя окислы, которые испаряются с поверхности вольфрама и осаждаются на холодных частях лампы в виде желтого, синего или бурого налета в зависимости от вида образовавшейся окиси; с азотом (реагируют пары вольфрама), образуя нитрид, бурый налет которого оседает на колбе и других деталях лампы; с парами воды («водяной цикл», см. § 6.4); с углеродом, образуя карбид вольфрама, уменьшающий механическую прочность проволоки и повышающий ее электрическое сопротивление.

Геометрические параметры тела накала. К основным геометрическим параметрам вольфрамового тела накала относятся (рис. 7.3): диаметр d и длина l вольфрамовой проволоки, из которой должно быть изготовлено тело накала; шаг спирали s, т. е. расстояние между осевыми линиями проволоки двух соседних витков; диаметр сердечника (керна) d_c (металлический проволочный стержень, на который навивается вольфрамовая проволока); коэффициент шага $k_ш$ и коэффициент керна k_c, определение которых дано в (7.2); диаметр и длина спирали ($d_{сп}$, $l_{сп}$)

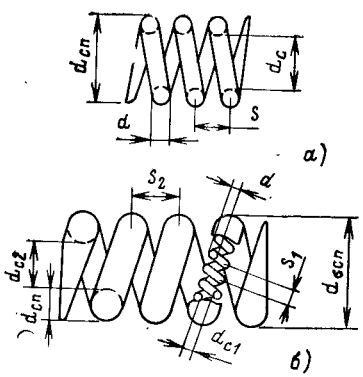


Рис. 7.3. Геометрические параметры спирали (*а*) и биспирали (*б*)

или биспирали ($d_{бсп}$, $l_{бсп}$); диаметр и длина тела накала ($d_{т,н}$, $l_{т,н}$). Эти параметры применяются для спирали, биспирали, триспирали и так далее, но в обозначение их вводятся цифровые индексы, например s_1 — шаг первичной спирали, s_2 — шаг биспирали и т. п. К геометрическим размерам относятся также форма, габаритные, присоединительные и другие размеры тела накала, размещенного в лампе.

Геометрические параметры тела накала взаимосвязаны. Из вольфрамовой проволоки заданной длины и диаметра можно получить спирали самых разных размеров, но чем меньше длина спирали, тем меньше должен быть ее шаг и больше диаметр керна. Наличие взаимосвязи параметров позволяет подобрать такое их сочетание, которое наилучшим образом удовлетворяет исходным требованиям. Наиболее независимыми и главными из перечисленных параметров являются диаметр d и длина l вольфрамовой проволоки, предназначенной для изготовления прямолинейного или спирального тела накала. Определение диаметра и длины нити — важнейшая задача расчета тела накала (§ 7.2 и 7.3).

Не менее важно определить затем значения коэффициентов шага и сердечника:

$$k_ш = \frac{s}{d};\quad k_c = \frac{d_c}{d};\quad k_{ш1} = \frac{s_1}{d};\quad k_{c1} = \frac{d_{c1}}{d};$$

$$k_{ш2} = \frac{s_2}{d_{сп}};\quad k_{c2} = \frac{d_{c2}}{d_{сп}}. \qquad (7.2)$$

Для этих коэффициентов практикой установлены довольно узкие диапазоны значений, при которых спирали получаются наиболее жесткими, формоустойчивыми и удобными в изготовлении (§ 7.4).

Рассчитав диаметр и длину нити и выбрав коэффициенты шага и сердечника, легко оценить диаметры и длины спиралей и биспиралей:

$$d_{сп} = d(k_c + 2);\quad d_{бсп} = 2d_{сп} + d_{c2} = d(k_{c1} + 2)(k_{c2} + 2); \qquad (7.3)$$

$$l_{сп} = l\frac{k_ш}{\pi(k_c + 1)};\quad l_{бсп} = l\frac{k_{ш1}k_{ш2}}{\pi^2(k_{c1} + 1)(k_{c2} + 1)}. \qquad (7.4)$$

Для средних значений коэффициентов шага и сердечника длина спирали равна примерно 10% длины нити, из которой она свита.

Длину спирали можно определить также по следующему выражению:

$$l_{сп} = Ns = \frac{ls}{\sqrt{\pi^2(d_c + d)^2 + s^2}};\quad N = \frac{l}{\pi(d_c + d)}, \qquad (7.5)$$

где N — общее число витков спирали, а s — ее шаг. Соотношения (7.5) можно применить для определения длины биспирали. Для этого сначала проводят расчет длины первичной спирали, а затем, приняв ее условно за нить, делают повторный расчет для вторичной спирали.

Далее остается выбрать форму и габариты тела накала, размеры и расположение отдельных его элементов, способы размещения тела накала в лампе (§ 7.4).

Чтобы рассчитать и сконструировать тело накала, необходимо знать следующие исходные данные (данные о лампе): номинальное напряжение лампы U; ее мощность P (или рабочий ток I тела накала); световой поток Φ, который должен излучаться лампой (что равносильно заданию световой отдачи η_V), срок службы τ, значение которого должно быть согласовано с заданной световой отдачей η_V, с учетом их тесной и практически однозначной связи (5.11). В ряде случаев в качестве исходных данных для расчета тела накала задаются и другие параметры лампы: сила света, светораспределение, яркость, механическая прочность, характер внутриламповой среды и т. д.

При расчете тела накала сначала рассматривают наиболее простой случай (расчет длины и диаметра идеальной вольфрамовой нити в вакууме), затем усложняют задачу (вольфрамовая спираль в вакууме) и наконец переходят к самым сложным случаям (спираль и биспираль в газе).

7.2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕЛА НАКАЛА ВАКУУМНЫХ ЛАМП

Расчет размеров идеальной нити. Из приведенного в § 7.1 определения идеальной нити следует, что подводимая к ней электрическая энергия расходуется только на излучение. Поэтому

$$P^* = \Phi^*_{ен} \text{ или } I^2 r_T = M_{eT}\pi d^* l^*, \qquad (7.6)$$

где P^* — подводимая мощность; $\Phi^*_{ен}$ — поток излучения нити; I — ток, проходящий через нить; r_T — сопротивление нити при температуре T; M_{eT} — энергетическая светимость нити при температуре T; d^* и l^* — соответственно диаметр и длина идеальной нити.

Известно, что при удельном сопротивлении нити ρ_T

$$r_T = \rho_T \frac{4l^*}{\pi d^{*2}}. \qquad (7.7)$$

Подставляя значение r_T в (7.6) и решая полученное уравнение относительно d^*, получаем:

$$d^* = I^{2/3} (4\rho_T/\pi^2 M_{eT})^{1/3}. \qquad (7.8)$$

Поскольку ρ_T и M_{eT} зависят от материала и температуры нити, то из (7.8) следует, что диаметр идеальной нити определяется током нити, ее материалом и температурой.

Для определения длины идеальной нити l^* выражение (7.6) запишем в несколько измененном виде:

$$\frac{U^2}{r_T} = M_{eT}\pi d^* l^*, \qquad (7.9)$$

где U — напряжение, подаваемое на нить. Подставляя в (7.9) значения r_T из (7.7) и d^* из (7.8) и решая полученное уравнение относительно l^*, получаем:

$$l^* = I^{1/3} U \left(\frac{1}{4\pi\rho_T M^2_{eT}}\right)^{1/3}. \qquad (7.10)$$

Как видно, длина идеальной нити определяется, в отличие от ее диаметра, не только током, материалом и температурой нити, но и напряжением, приложенным к ней.

Из сказанного следует, что для определения диаметра и длины идеальной вольфрамовой нити нужно знать (задать) два каких-либо электрических параметра нити (например, напряжение U и мощность P^*) и ее температуру T. Вместо температуры обычно задается световой поток Φ^* или, чаще, световая отдача $\eta^*_{V_н}$, которая для идеальной нити является функцией только температуры, так как вся подводимая к идеальной нити мощность отводится излучением. Поэтому $\eta^*_{V_н}$ определяется как

$$\eta^*_{V_н} = \frac{\Phi^*_н}{P^*} = \frac{1{,}06\pi^2 d^* l^* L_T}{\pi d^* l^* M_{eT}}, \qquad (7.11)$$

где множитель 1,06 учитывает неравнояркость вольфрамового тела накала. Согласно (7.1) яркость L_T и энергетическая светимость M_{eT} выражаются соотношениями

$$L_T = C_L T^{n_L} \text{ и } M_{eT} = C_M T^{n_M}, \qquad (7.12)$$

поэтому

$$\eta^*_{V_н} = 1{,}06\pi \frac{C_L}{C_M} T^{n_L - n_M}, \qquad (7.13)$$

где C_L и C_M — постоянные, а n_L и n_M — показатели степени в выражениях для яркости и энергетической светимости, значения которых приведены в табл. 7.2. При оперативных

оценках диаметра и длины нити для диапазона температур тела накала 2400—2900 К принимают: $n_L \approx 10$, $n_M \approx 5$ и $n_\rho \approx 1{,}2$.

Итак, чтобы определить диаметр d^* и длину l^* идеальной вольфрамовой нити по заданным значениям напряжения и мощности (или другой пары электрических параметров) и световой отдачи, нужно: 1) по табл. 7.2 определить температуру T, соответствующую заданной световой отдаче; 2) для полученной температуры по табл. 7.2 найти значения M_{eT} и ρ_T; 3) зная указанные параметры, а так же $I^* = P^*/U^*$, по (7.8) и (7.10) определить d^* и l^*.

Расчет размеров идеальной спирали. Идеальной называют спираль, свитую из идеальной вольфрамовой нити. Излучательная способность такой спирали характеризуется коэффициентами *полного* δ и *видимого* $\delta_в$ излучения, представляющими собой соответственно отношения потока излучения и светового потока спирали ($\Phi_{есп}$, $\Phi_{сп}$) к аналогичным потокам нити, из которой спираль изготовлена ($\Phi_{ен}$, $\Phi_н$):

$$\delta = \Phi_{есп}/\Phi_{ен}; \quad \delta_в = \Phi_{сп}/\Phi_н. \qquad (7.14)$$

Для определения коэффициента полного излучения спирали δ имеются расчетные методы, но они весьма приближенные и трудоемкие. Поэтому в настоящее время при расчете спирального тела накала пользуются установленной экспериментально зависимостью между коэффициентом шага идеальной спирали $k_ш$ и ее коэффициентом излучения δ (см. ниже). Правомерность такого решения подтверждают исследования, показавшие, что $k_ш$ оказывает наибольшее влияние на δ по сравнению с другими факторами (коэффициентом керна, температурой и др.):

$k_ш$ . . .	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
δ	0,5	0,6	0,66	0,7	0,74	0,765	0,785	0,8	0,82	0,84	0,85

Таблица 7.3

$k_ш$	Значения δ при температурах тела накала T, К						
	500	1000	1200	1400	1600	1800	2000
1,3	0,92	0,84	0,81	0,79	0,765	0,74	0,73
1,4	0,93	0,87	0,85	0,83	0,80	0,78	0,77
1,5	0,94	0,88	0,86	0,84	0,82	0,80	0,79
1,6	0,945	0,89	0,875	0,855	0,84	0,82	0,81
1,7	0,95	0,91	0,89	0,875	0,86	0,84	0,83
1,8	0,96	0,92	0,90	0,89	0,875	0,85	0,845
2,0	0,97	0,94	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87

Зависимость δ от температуры тела накала обусловлена снижением интегрального коэффициента отражения вольфрама с ростом температуры. Эта зависимость для разных значений $k_ш$ приведена в табл. 7.3. Ею пользуются при расчете тел накала, работающих при относительно низких температурах (низковольтные, миниатюрные лампы).

Установлено, что при $T > 2000$ К коэффициенты $\delta_в$ и δ связаны соотношением

$$\delta_в \approx (0{,}93 \div 0{,}94)\delta. \qquad (7.15)$$

Аналогичное соотношение имеет место также для световых отдач идеальной нити η^*_V и изготовленной из нее спирали η_V:

$$\eta_V = \frac{\Phi^*}{P} = \frac{1{,}06\pi^2 d^* l^* L_T \delta_в}{\pi d^* l^* M_{eT}\delta} = \eta^*_V \frac{\delta_в}{\delta} = (0{,}93 \div 0{,}94)\,\eta^*_V. \qquad (7.16)$$

С учетом изложенного энергетическая светимость идеальной спирали M'_{eT} следующим образом может быть выражена через энергетическую светимость идеальной нити M_{eT} и коэффициент полного излучения спирали δ:

$$M'_{eT} = \delta M_{eT}. \qquad (7.17)$$

Тогда баланс энергии идеальной спирали, по аналогии с (7.6) и (7.9) будет иметь следующий вид:

$$P = \Phi^*_e \text{ или } I^2 r_T = M'_{eT}\pi d l = \delta M_{eT}\pi d l; \qquad (7.18)$$

$$\frac{U^2}{r_T} = \delta M_{eT}\pi d l, \qquad (7.19)$$

где d и l — диаметр и длина нити, из которой изготовлена спираль.

Делая преобразования, аналогичные проведенным при расчете идеальной нити, получаем:

$$d = I^{2/3}\left(\frac{4\rho_T}{\pi^2 M_{eT}}\right)^{1/3}\left(\frac{1}{\delta}\right)^{1/3} = d^*\left(\frac{1}{\delta}\right)^{1/3}; \qquad (7.20)$$

$$l = I^{1/3}U\left(\frac{1}{4\pi\rho_T M^2_{eT}}\right)^{1/3}\left(\frac{1}{\delta}\right)^{2/3} = l^*\left(\frac{1}{\delta}\right)^{2/3}. \qquad (7.21)$$

т. е. при одних и тех же I, U и T диаметр d и длина l нити, из которой сделано идеальное спирализованное тело накала, отличаются от диаметра d^* и длины l^* нити идеального прямого (неспирализованного) тела накала.

Итак, чтобы определить диаметр d и длину l нити, из которой изготовлена идеальная спираль, по заданным значениям напряжения U и мощности P (или другой пары электрических параметров) и световой отдачи, нужно:

1) выбрать коэффициент шага $k_ш$ и керна k_c, исходя из приведенных в § 7.4 рекомендаций; 2) по коэффициенту шага определить δ (см. табл. 7.3), а затем и $\delta_в \approx (0{,}93 \div 0{,}94)\delta$; 3) по световой отдаче спирали η_V, используя соотношение (7.16), найти световую отдачу η^*_V прямолинейной нити, равной по диаметру и длине той нити, из которой изготовлена спираль; 4) по световой отдаче η^*_V в табл. 7.2 найти соответствующую температуру; 5) для полученной температуры по табл. 7.2 найти M_{eT} и ρ_T; 6) зная указанные параметры, а также $I=P/U$, по формулам (7.20) и (7.21) определить d и l. Далее по формулам (7.3) и (7.4) определяются диаметр и длина спирали ($d_{сп}$ и $l_{сп}$).

Учет охлаждения тела накала электродами и держателями. Электроды и держатели, обладая теплопроводностью, отводят часть теплоты от тела накала, создавая на нем участки с пониженной температурой (рис. 7.4). Охлаждающее действие электродов и держателей не распространяется на среднюю часть участков тела накала между поддерживающими его элементами. Электроды всегда толще держателей, поэтому прилегающие к ним участки спирали охлаждаются сильнее.

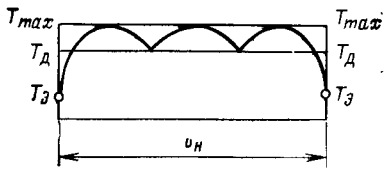


Рис. 7.4. Распределение температуры вдоль тела накала, охлаждаемого электродами и держателями

Если диаметры электрода $d_э$ и нити d находятся в соотношении $d_э \geq 6d$ (как обычно принимается), то температура у электрода $T_э \approx 0{,}25T_{max}$. Температура нити у держателя $T_д \approx (0{,}7 \div 0{,}75)T_{max}$.

Поскольку электроды и держатели изменяют температуру тела накала, то все электрические и световые параметры нити с вводами (электродами) и держателями будут отличаться от соответствующих параметров идеальной нити. А чтобы параметры остались прежними, необходимо изменить длину нити на так называемую *эквивалентную поправку*. Эта поправка компенсирует охлаждающее действие электродов и держателей. Вводить поправки к диаметру нити нецелесообразно, так как ассортимент вольфрамовых проволок по диаметру ограничен. Значительно удобнее пользоваться поправками к длине нити. Легко заметить, что общая эквивалентная поправка Δl к длине нити, охлаждаемой двумя электродами и n держателя, равна:

$$\Delta l = 2(\Delta l_э + n\Delta l_д), \qquad (7.22)$$

где $\Delta l_э$ и $\Delta l_д$ — эквивалентные поправки к длине нити, обусловленные соответственно электродами и держателями.

Эквивалентная поправка к длине нити в вакууме, вызванная охлаждающим действием электрода, может быть определена по следующим выражениям, предложенным Форсайтом и Уортингом:

$$\Delta l_{э\,(\rho)} = \sqrt{d}/Q; \quad \Delta l_{э\,(\Phi_e)} = 2{,}25\sqrt{d}/Q; \quad \Delta l_{э\,(\Phi)} = 3{,}0\sqrt{d}/Q; \quad \Delta l_{э(m)} = 4{,}45\sqrt{d}/Q, \qquad (7.23)$$

где $\Delta l_{э\,(\rho)}$, $\Delta l_{э\,(\Phi_e)}$, $\Delta l_{э\,(\Phi)}$, $\Delta l_{э\,(m)}$ — эквивалентные поправки по сопротивлению, потоку излучения, световому потоку, скорости испарения вольфрама, а Q — некоторая функция от температуры нити (см. ниже). Соотношения (7.23) справедливы и для спирали в вакууме.

Температура T_{max}, К	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
Q, см$^{-0,5}$	0,27	0,34	0,41	0,49	0,57	0,66	0,75	0,85	0,95

Эквивалентная поправка к длине нити в вакууме, вызванная охлаждающим действием держателя, определяется из соотношения

$$\Delta l_д/\Delta l_э = m, \qquad (7.24)$$

где $m \approx 0{,}5$ при $T_д \approx (0{,}7 \div 0{,}75)T_{max}$. Иначе говоря, принимается, что охлаждающее действие одного держателя — с обеих сторон от места его контакта с телом накала — эквивалентно охлаждению, производимому одним электродом.

Поправки к длине нити применяются следующим образом. Допустим, что, исходя из заданных напряжений U, мощности P и световой отдачи η_V, по формулам (7.20) и (7.21) определены диаметр d и длина l нити идеальной спирали без учета охлаждающего действия электродов и держателей. Если по расчетным значениям d и l изготовить лампу, то не будут выполнены требования по световой отдаче. Это происходит потому, что существующие в реальной лампе электроды и держатели снижают температуру и несколько уменьшают сопротивление нити, что в итоге сопровождается при неизменном напряжении на лампе уменьшением световой отдачи. Чтобы обеспечить заданную световую отдачу, нужно прежде всего сохранить прежнее сопротивление тела накала r_T. Для этого увеличивают рассчитанную по (7.21) длину нити тела накала на сумму эквивалентных поправок от электродов и держателей по удельному сопротивлению ρ и получают новое значение длины нити в реальной лампе $l_р$:

$$l_р = l + \Sigma\Delta l_\rho,$$

где $\Sigma\Delta l_\rho = \Delta l_{э\,(\rho)} + \Delta l_{д\,(\rho)}$.

Новая длина нити $l_р$ обеспечит исходные (заданные) мощность и температуру тела накала. Однако вследствие охлаждающего действия электродов и держателей световой поток реального тела накала будет ниже, чем у идеальной нити. Чтобы этого не произошло, необходимо уменьшить рассчитанную по (7.21) длину тела накала на сумму

эквивалентных поправок по световому потоку. Окончательное выражение для длины нити реального тела накала приобретает вид:

$$l_р = l + \Sigma\Delta l_ρ - \Sigma\Delta l_Ф,$$

где $\Sigma\Delta l_Ф = \Delta l_{э\,(Ф)} + \Delta l_{д\,(Ф)}$.

В ряде случаев поправки к длине нити удобно заменить эквивалентными поправками к выбранному для расчета лампы исходному (заданному) напряжению. Это возможно в связи с тем, что изменение длины идеальной нити при прочих равных условиях однозначно изменяет напряжение на ней. Поправки к напряжению ΔU рассчитаны

Таблица 7.4

Параметр A	Коэффициент			T_{max}, К	T_0, К
	B	C	D		
Напряжение U	0,154	0,081	0,056	1000—2500	Любое значение
Сила тока I	0,338	0,182	0,004	600—3800	300—1400
Поток излучения $Ф_e$	0,480	0,160	0,060	1500—3500	300—900
Скорость испарения m	0,292	0,160	0,084	1100—3000	300—900

так, чтобы при увеличении напряжения реальной нити до значения $U+\Delta U_A$ ее соответствующий параметр A имел бы то же значение, что у идеальной нити того же размера при напряжении U. Для нити в вакууме рекомендуются следующие поправки к напряжению:

$$\Delta U_ρ = 2\frac{\sqrt{ρ_T M_{eT}}}{Q};\quad \Delta U_{Фe} = 4{,}5\frac{\sqrt{ρ_T M_{eT}}}{Q};\quad \Delta U_Ф = 6{,}0\frac{\sqrt{ρ_T M_{eT}}}{Q};\quad \Delta U_m = 9{,}9\frac{\sqrt{ρ_T M_{eT}}}{Q}. \qquad (7.25)$$

Эти соотношения справедливы и для спирали в вакууме.

Приближенное значение поправки к напряжению в вольтах можно определить также по следующей эмпирической формуле:

$$\Delta U_A = B\frac{T_{max}}{1000} + C\frac{T_0}{1000} - D, \qquad (7.26)$$

где T_{max} — максимальное значение температуры нити; T_0 — температура нити у электрода или держателя; B, C и D — экспериментально полученные коэффициенты, значения которых даны в табл. 7.4.

По формуле (7.26) определяются поправки к напряжению из расчета на один электрод ($\Delta U_э$) и на одну сторону от держателя ($\Delta U_д$). Общая суммарная поправка к напряжению определяется по формуле

$$\Delta U = 2(\Delta U_э + n\Delta U_д). \qquad (7.27)$$

Эмпирический график для расчета тела накала вакуумных ламп. Формулы пересчета. По данным многочисленных

лабораторных и производственных экспериментов выведены разнообразные эмпирические зависимости, построены графики, устанавливающие связи между задаваемыми напряжением, мощностью и световой отдачей лампы, с одной стороны, и диаметром и длиной нити тела накала — с другой. Такие зависимости и графики бывают удобны для оперативного (без расчета) определения размеров нити по заданным параметрам лампы. На рис. 7.5 приведен один из таких графиков для определения диаметра и длины нити вакуумных ламп. Если, например, задано, что U=127 В,

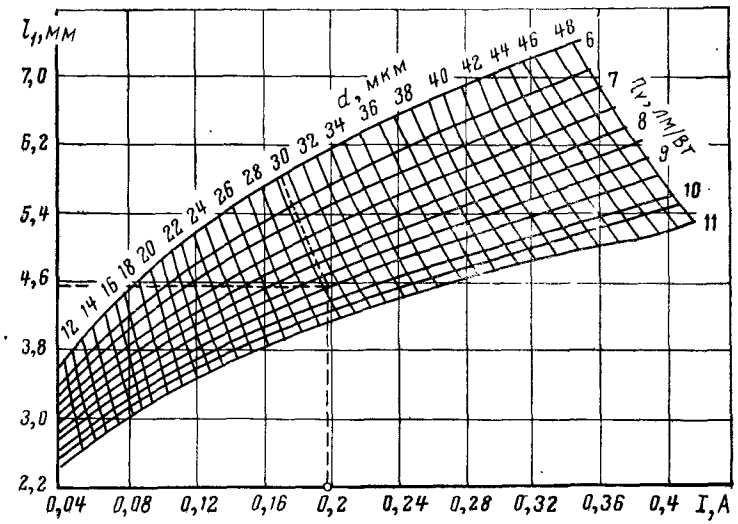


Рис. 7.5. График для расчета диаметра d и длины нити l_1 вакуумных ламп на 1 В

P=25 Вт и η_V=9,6 лм/Вт, то I=0,197 А и по нанесенной на рисунке сетке легко определить (см. пунктирные линии), что диаметр нити d=29,3 мкм, $l_1 = l/U$=4,55 мм/В и длина нити l=580 мм.

После того как определены расчетные диаметр и длина нити, обычно изготовляют опытные лампы требуемой конструкции и измеряют их параметры. Если параметры ламп отличаются от требуемых не более чем на ±10%, то производится пересчет размеров нити по формулам

$$d' = d\left(\frac{P'}{P}\right)^{2/3}\left(\frac{\eta_V}{\eta'_V}\right)^{1/5};\quad l' = l\left(\frac{P'}{P}\right)^{1/3}\left(\frac{\eta_V}{\eta'_V}\right)^{3/5}, \qquad (7.28)$$

где d' и l' — исправленные значения диаметра и длины нити, обеспечивающие получение требуемых значений мощно-

сти P' и световой отдачи η'_V. Выражения (7.28) можно заменить более удобными для использования формулами пересчета:

$$d\% = 2/3P\% - 1/5\eta_V\%;\ l\% = 1/3P\% - 3/5\eta_V\%, \qquad (7.29)$$

где $P\%$ и $\eta_V\%$ — выраженные в процентах отклонения полученных в образцах ламп мощности и световой отдачи от требуемых, а $d\%$ и $l\%$ — выраженные в процентах необходимые поправки на диаметр и длину нити. Формулы (7.28) и (7.29) можно использовать для внесения поправок в размеры нитей тел накала не только вакуумных, но и газополных ламп. Кроме того, они позволяют вносить не только поправки, но и рассчитывать тела накала новых ламп. В этом случае подбирают из имеющихся ламп близкую по параметрам и конструкции к рассчитываемой и весь расчет размеров нити сводится к внесению поправок.

Пусть поставлена задача рассчитать диаметр и длину нити для лампы мощностью $P=60$ Вт и со световой отдачей $\eta_V=11$ лм/Вт. Подбираем из числа существующих близкую по параметрам лампу с $P=63{,}5$ Вт и $\eta_V=10{,}2$ лм/Вт, нить которой имеет диаметр $d=50$ мк и длину $l=480$ мм. Нетрудно заметить, что в этом случае $P\%=-5{,}5\%$, $\eta_V\%=+7{,}1\%$. Подставляя эти значения в (7.29), получаем $d\%=-5{,}1\%$, а $l\%=-2{,}4\%$, т. е. у разрабатываемой лампы диаметр нити должен быть на 5,1% и длина на 2,4% меньше, чем у выбранного аналога.

Метод корректировки результатов расчетов и конструкторских решений на основе изготовления и испытания макетных и опытных образцов ламп нашел широкое распространение при разработке электрических ламп накаливания. Это объясняется относительной простотой, а точнее — высоким уровнем технологии их изготовления, а также низкой стоимостью ламп. На основе испытания опытных ламп часто вводят также поправки к размерам нити, вызванные охлаждающим действием на тело накала электродов и держателей.

7.3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕЛА НАКАЛА ГАЗОПОЛНЫХ ЛАМП

Расчет спирали в газе по эмпирическим формулам. Аналитические зависимости для определения диаметра и длины нити тела накала, работающего в газе, можно вывести из энергетического баланса газополной лампы (6.5), как это делалось для вакуумных ламп. Такие выражения получены. Однако в связи с их сложностью в ряде случаев пользуются эмпирическими формулами. Ниже рассмотрен

один из таких способов расчета, называемый «методом Q_{200}».

Для расчета задаются следующие исходные данные: напряжение U, мощность P, световая отдача η_V, состав наполняющей лампу смеси газов (86% аргона+14% азота). Определение размеров нити осуществляется по формулам

$$Q_{200} = MI^n = M_T\alpha_ш\alpha_c I^n; \qquad (7.30)$$

$$l = \frac{CQ_{200}}{I}U, \qquad (7.31)$$

где Q_{200} — масса, мг, отрезка вольфрамовой проволоки длиной 200 мм (в ГОСТ на вольфрам приводится таблица значений Q_{200} для разных диаметров проволоки); M и C — эмпирические коэффициенты, зависящие от мощности лампы, световой отдачи, природы наполняющего газа (коэффициент M зависит также от коэффициентов шага $k_ш$ и сердечника k_c спирали; $M=M_T\alpha_ш\alpha_c$); $\alpha_ш$ и α_c — поправочные коэффициенты к M_T, обусловленные отклонением $k_ш$ и k_c от принятых при определении M_T; n — показатель степени, который для газополных ламп общего назначения принимается равным 1,41. Значение коэффициентов M_T и

Таблица 7.5

Напряжение U, В	Мощность P, Вт	Коэффициент сердечника k_{cT}	Коэффициент шага $k_{шT}$	M_T	C
110—127	25	5,0	1,35	14,00	0,295
	40	4,0	1,60	13,60	0,295
	60	4,0	1,60	13,54	0,296
	75	3,0	1,40	14,05	0,297
	100	3,0	1,40	14,22	0,299
	150	3,0	1,40	14,35	0,299
	200	3,0	1,40	15,10	0,303
	300	3,0	1,40	14,40	0,310
	400	3,0	1,40	14,40	0,305
	500	3,0	1,40	14,40	0,305
	750—1000	3,0	1,40	13,80	0,305
	1500	2,0	1,60	12,00	0,320
220	40	5,0	1,45	13,00	0,280
	60	5,0	1,35	14,00	0,295
	75—150	5,0	1,40	14,90	0,295
	200	3,0	1,40	15,10	0,301
	300	3,0	1,40	14,10	0,301
	400—500	3,0	1,40	15,10	0,305
	750—1000	3,0	1,40	14,20	0,305
	1500	3,0	1,40	13,80	0,309

C для ламп накаливания общего назначения (при постоянном значении световой отдачи, равном 16 лм/Вт) приведены в табл. 7.5.

На рис. 7.6 [1] приведены зависимости, позволяющие определить поправочные коэффициенты $\alpha_ш$ и α_c к табличному значению M_T. По оси абсцисс откладываются отношения выбранных коэффициентов шага и сердечника рассчитываемой лампы к соответствующим коэффициентам, указанным в табл. 7.5.

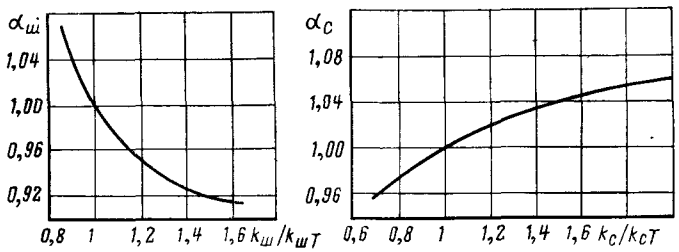


Рис. 7.6. Графики для определения поправочных коэффициентов $\alpha_ш$ и α_c к табличному значению M_T

Выше отмечалось, что в табл. 7.5 значения M_T и C приведены для световой отдачи $\eta_{V1}=16$ лм/Вт. Если для расчета лампы задается какая-то другая световая отдача $\eta_V \neq 16$ лм/Вт, то предварительно нужно подсчитать, какой ток I_{16} и напряжение U_{16} нужно задать конструируемой лампе, чтобы она имела световую отдачу не η_V, а $\eta_{V1}=16$ лм/Вт. Для этого можно воспользоваться уравнением (5.12): $I_{16}=I(16/\eta_V)^{0,3}$; $U_{16}=U(16/\eta_V)^{0,5}$, где I, U, η_V — исходные (заданные) ток, напряжение и световая отдача. Полученные значения I_{16} и U_{16} необходимо подставить в (7.30) и (7.31) для расчета Q_{200}, d и l. Следует заметить, что переход от массы отрезка вольфрамовой проволоки длиной 200 мм Q_{200} к ее диаметру d можно осуществить не только с помощью таблиц, но и по формуле

$$d=18{,}2\sqrt{Q_{200}}, \qquad (7.32)$$

где d — диаметр, мкм; Q_{200} — масса, мг. Эта формула получается из равенства $Q_{200}=(\pi d^2/4)\gamma 200$, если принять для вольфрама $\gamma=19{,}3$ г/см^3.

Изложенное предопределяет следующую последовательность расчета диаметра и длины нити спирального тела накала, работающего в газе, по заданным напряжению U, мощности P, световой отдаче $\eta_V \neq 16$ лм/Вт и составу наполняющей лампу газовой смеси (86% аргона+14% азота): 1) определить ток $I=P/U$; 2) по формуле (5.12) определить I_{16} и U_{16}; 3) по табл. 7.5 найти коэффициенты M_T и C, соответствующие заданным U и P; 4) по рис. 7.6, исходя из принятых $k_ш$ и k_c и табличных значений $k_{ш,T}$ и $k_{c,T}$, соответствующих заданным U и P, найти поправочные коэффициенты $\alpha_ш$ и α_c к коэффициенту M_T; 5) определить $M=M_T\alpha_ш\alpha_c$; 6) подставляя в (7.30) значения M и I_{16}, найти $Q_{200}=M_T\alpha_ш\alpha_c I_{16}^{1,41}$; по (7.32) найти диаметр нити $d=18{,}2\sqrt{Q_{200}}$; 8) подставляя в (7.31) значения C, Q_{200}, U_{16} и I_{16}, найти длину нити $l=CQ_{200}(U_{16}/I_{16})$.

Когда диаметр и длина нити найдены, можно приступить к расчету диаметра спирали $d_{сп}$ и ее длины $l_{сп}$ по формулам (7.3) и (7.4). Правильность расчета диаметра и длины нити может быть проверена, как указывалось выше, путем изготовления и испытания опытных газополных ламп. При необходимости для уточнения значений d и l применяются формулы пересчета (7.28) или (7.29) в порядке, указанном в § 7.2.

Для расчета диаметра и длины нити биспиралей, работающих в смеси газов (86% аргона+14% азота), используются следующие формулы:

$$d=\frac{AP^{2/3}}{U^{2/3}\eta_V^{1/5}}; \quad l=\frac{BU^{2/3}P^{1/3}}{\eta_V^{3/5}}, \qquad (7.33)$$

где A и B — коэффициенты, значения которых для заданных напряжения и мощности могут быть получены по зависимостям, представленным на рис. 7.7; d и l — диаметр и длина вольфрамовой нити, из которой изготовлена биспираль [7].

Понятие о едином инженерном методе расчета ламп накаливания. Методы расчета спирального и биспирального тел накала газополных ламп, основанные на эмпирических

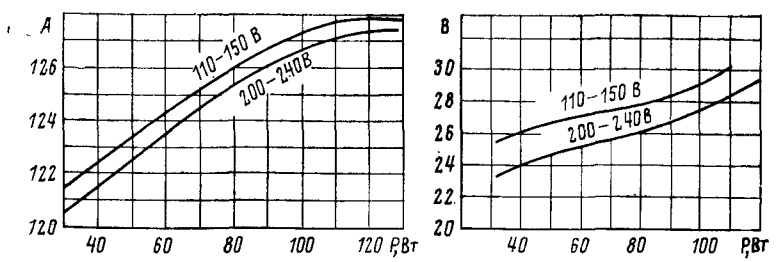


Рис. 7.7. Графики для определения коэффициентов A и B, входящих в формулу (7.33) для расчета диаметра и длины нити биспирали

формулах, обладают некоторыми недостатками. Например, используемые в формулах экспериментальные коэффициенты действительны не для всех групп спиральных ламп (этот недостаток еще в большей степени относится к биспиральным аргоновым и особенно криптоновым лампам), применение формул (7.30) и (7.31) для расчета тела накала спиральных ламп, световая отдача которых существенно отличается от 16 лм/Вт, может привести к заметным погрешностям и др. Рассматриваемый ниже единый инженерный метод расчета, разработанный В. С. Литвиновым [1], в значительной степени лишен указанных недостатков, так как он базируется на внутреннем балансе энергии газополной лампы накаливания, учитывает охлаждающее действие электродов и держателей, экранировку светового потока цоколем лампы. В этом методе расчет тела накала газополной лампы сведен с помощью специальных коэффициентов (полученных расчетно и частично проверенных экспериментально) к расчету эквивалентного вакуумного варианта лампы.

Напомним уравнение баланса энергии газополной лампы (6.5), которое запишем без некоторых ненужных в данном случае индексов:

$$P=\Phi_e+P_г+P_д, \qquad (7.34)$$

где P — мощность, идущая на нагрев тела накала (мощность лампы); Φ_e — поток излучения тела накала; $P_г$ — мощность, отводимая от тела накала газом (потери в газе через теплопроводность и конвекцию); $P_д$ — мощность, отводимая от тела накала электродами и держателями.

Нетрудно заметить, что сумма потока излучения реальной спирали Φ_e и мощности, отводимой электродами и держателями $P_д$, равна потоку излучения идеальной спирали Φ^*_e, имеющей ту же температуру, что и спираль данной лампы. Учитывая (7.18), можно написать:

$$\Phi^*_e=\Phi_e+P_д=\delta M_{eT}\pi dl, \qquad (7.35)$$

где δ — коэффициент излучения спирали; M_{eT} — энергетическая светимость вольфрамовой нити при температуре T; d и l — диаметр и длина нити, из которой изготовлена спираль.

После подстановки (7.35) в (7.34) уравнение баланса энергии газополной лампы приобретает следующий вид:

$$P=\delta M_{eT}\pi dl+P_г \qquad (7.36)$$

или

$$P(1-P_г/P)=\delta M_{eT}\pi dl. \qquad (7.37)$$

Проведя некоторые преобразования, обозначив через k отношение мощности, отводимой через газ, к мощности лампы ($k=P_г/P$) и выразив мощность лампы P через ток I, напряжение U и сопротивление r_T лампы, получим:

$$I^2 r_T(1-k)=\delta M_{eT}\pi dl; \qquad (7.38)$$

$$(U^2/r_T)(1-k)=\delta M_{eT}\pi dl. \qquad (7.39)$$

Проведение преобразований, аналогичных сделанным при расчете идеальной нити (§ 7.2), приводит к следующим результатам:

$$d=I^{2/3}\left(\frac{4\rho_T}{\pi^2 M_{eT}}\right)^{1/3}\left(\frac{1}{\delta}\right)^{1/3}(1-k)^{1/3}; \qquad (7.40)$$

$$l=Ud^{1/2}\left(\frac{1}{4\rho_T M_{eT}}\right)^{1/2}\left(\frac{1}{\delta}\right)^{1/2}(1-k)^{1/2}. \qquad (7.41)$$

Поскольку значения I и U задаются при постановке задачи, а ρ_T и M_{eT} являются табулированными величинами (табл. 7.2), то для расчета d и l по формулам (7.40) и (7.41) необходимо определить лишь полный коэффициент излучения δ, коэффициент $k=P_г/P$ и температуру тела накала T.

Если задан или выбран коэффициент шага спирали $k_ш$, то δ легко определить (см. с. 116). Если рассчитывается биспираль, то исходят из того, что коэффициент излучения биспирали $\delta\approx\delta_1\delta_2$, где δ_1 и δ_2 — соответственно коэффициенты излучения первичной и вторичной спирали. Значения δ_1 и δ_2 можно найти на с. 116, по известным (заданным или выбранным) значениям коэффициентов шага первичной $k_{ш1}$ и вторичной $k_{ш2}$ спиралей.

Значение коэффициента k, характеризующего долю потерянной в газе мощности, определяется по кривым, изображенным на рис. 7.8, 7.9. На рис. 7.8 (спираль) нижние кривые построены для $k_ш=1{,}3$ и $k_с=6$, а верхние — для $k_ш=1{,}7$ и $k_с=3$. На рис. 7.9 (биспираль) нижние кривые определены при $k_{ш1}=1{,}4$; $k_{ш2}=1{,}6$; $k_{с1}=2{,}0$ и $k_{с2}=2{,}6$, а верхние — при $k_{ш1}=1{,}8$; $k_{ш2}=2{,}0$; $k_{с1}=1{,}7$ и $k_{с2}=2{,}0$. Для других значений коэффициентов шага и сердечника определение относительных потерь в газе производится по формулам:

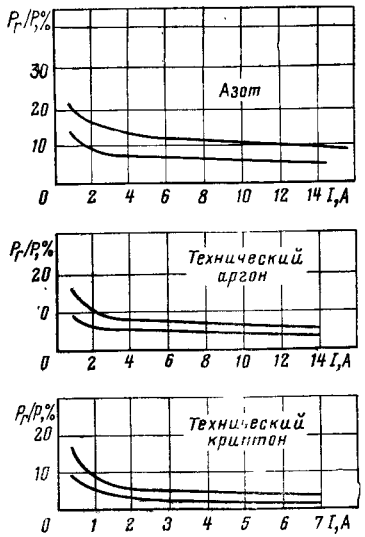
для спирали

$$k\approx k_{min}\frac{k_ш}{k_{шmin}}\sqrt[3]{\frac{k_{cmax}}{k_c}}; \qquad (7.42)$$

для биспирали

$$k \approx k_{min} \frac{k_{ш1} k_{ш2}}{k_{ш1min} k_{ш2min}} \sqrt[3]{\frac{k_{c1max} k_{c2max}}{k_{c1} k_{c2}}}, \qquad (7.43)$$

где k_{min} — минимальные относительные потери в газе (для спирали — при $k_ш = k_{шmin} = 1{,}3$ и $k_c = k_{cmax} = 6$; для биспирали — при $k_{ш1} = k_{ш1min} = 1{,}4$; $k_{ш2} = k_{ш2min} = 1{,}6$; $k_{c1} = k_{c1max} = 2{,}0$ и $k_{c2} = k_{c2max} = 2{,}6$); $k_ш$ и k_c — коэффициенты шага и сердечника для рассчитываемой спирали; $k_{ш1}$, $k_{ш2}$, k_{c1} и k_{c2} — аналогичные коэффициенты для рассчитываемой биспирали.



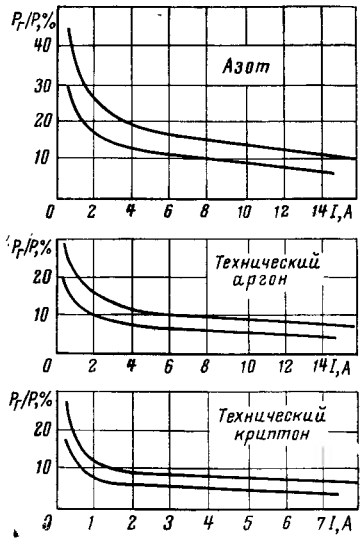


Рис. 7.8. Зависимость относительных потерь мощности через газ от тока спиральных газополных ламп накаливания общего назначения (срок службы $\tau = 1000$ ч; давление газа в лампе в «холодном» состоянии $p_0 = 800 \div 860$ гПа (600—650 мм рт. ст.)

Рис. 7.9. Зависимость относительных потерь мощности через газ от тока биспиральных ламп накаливания общего назначения (срок службы $\tau = 1000$ ч; давление газа в лампе в «холодном» состоянии $p_0 = 800 \div 860$ гПа (600—650 мм рт. ст.)

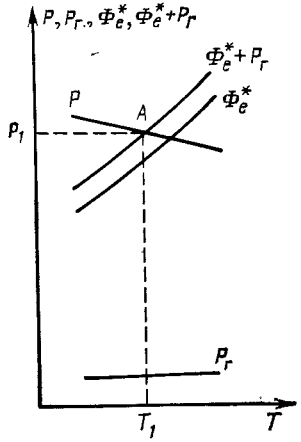
Зависимости, показанные на рис. 7.8 и 7.9, справедливы при сроке службы ламп $\tau = 1000$ ч. При меньших сроках службы (400, 100, 40 ч) коэффициент k определяется по следующим равенствам [6]:

$$k_{400} = 0{,}97 k_{1000}; \quad k_{100} = 0{,}9\, k_{1000}; \quad k_{40} = 0{,}76 k_{1000}. \qquad (7.44)$$

Для определения температуры тела накала T определяют сначала световую отдачу прямой идеальной нити в вакууме η^*_V из следующего выражения, связывающего ее со световой отдачей реальной рассчитываемой лампы η_V:

$$\eta^*_V = \eta_V \frac{\delta \alpha_ц \alpha_д}{\delta_в (1 - k)}, \qquad (7.45)$$

где $\alpha_ц$ — коэффициент, учитывающий экранировку светового потока тела накала цоколем лампы (для ламп накаливания общего назначения $\alpha_ц \approx 1{,}04 \div 1{,}08$; для низковольтных ламп $\alpha_ц$ может быть значительно выше); $\alpha_д$ — коэффициент, учитывающий охлаждающее действие электродов и держателей (для ламп общего назначения $\alpha_д \approx 1{,}02 \div 1{,}03$); δ и $\delta_в$ — коэффициенты излучения (общий и в видимой области спектра); для спирали $\delta_в/\delta = 0{,}94$ и для биспирали $\delta_в/\delta = 0{,}88$. Когда световая отдача идеальной нити η^*_V определена, то по табл. 7.2 находят ее температуру T.



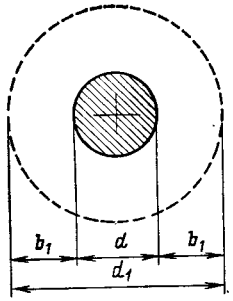


Рис. 7.10. График для определения основных параметров ламп накаливания

Рис. 7.11. Схематическое изображение застойного слоя вокруг тела накала

Теперь, когда найдены δ, k и T, по формулам (7.40) и (7.41) можно рассчитать диаметр и длину нити, из которой должно быть сделано тело накала газополной лампы. Далее для принятых коэффициентов шага и сердечника по формулам (7.3) и (7.4) определяются диаметр и длина спирали ($d_{сп}$, $l_{сп}$) или биспирали ($d_{бсп}$, $l_{бсп}$).

Проверка правильности проведенных расчетов может быть осуществлена с помощью опытных ламп. Можно также определить параметры лампы в ее рабочем режиме пу-

тем графического решения уравнения баланса энергии (7.36). На рис. 7.10 построены зависимости мощности лампы P, потерь в газе $P_г$ и потока излучения идеальной спирали Φ^*_e от температуры тела накала T при постоянном напряжении питания. Суммируя Φ^*_e и $P_г$, получаем новую кривую, показывающую зависимость суммы $\Phi^*_e+P_г$ от температуры T. Легко заметить, что точке пересечения кривых $\Phi^*_e+P_г$ и P будут соответствовать на оси ординат — мощность рассчитываемой лампы, а на оси абсцисс — температура тела накала, от которой зависит световая отдача.

Кривые, изображенные на рис. 7.10, строятся по уравнениям

$$P=\beta\frac{U^2}{\rho_T\frac{4l}{\pi d^2}};\quad P_г=\frac{2\pi l_{т,н}}{\ln\frac{d_1}{d_{т,н}}}(\varphi-\varphi_1);$$

$$\Phi^*_e=\frac{1}{\beta}\delta M_{eT}\pi dl, \qquad (7.46)$$

где β — коэффициент, учитывающий охлаждающее действие электродов и держателей (для ламп накаливания общего назначения $\beta\approx1{,}01\div1{,}02$); d и l — диаметр и длина нити; $d_1=2b_1+d_{т,н}$, где b_1 — толщина застойного слоя (слой вокруг тела накала, в пределах которого теплота передается только теплопроводностью — рис. 7.11); $d_{т,н}$ и $l_{т,н}$ — диаметр и длина тела накала (нити, спирали, биспирали); φ и φ_1 — величины, связанные с теплопроводностью, численные значения которых для разных температур тела накала и газовых сред приведены в табл. 7.6 и на рис. 7.12 (значение φ находится для температуры нити T, а φ_1 — для средней температуры газа в лампе T_1, которая у ламп накаливания общего назначения может быть принята равной 400—500 К).

Таблица 7.6. Таблица значений φ к формуле для определения $P_г$

T, К	N_2	86%Ar+14%N_2	Ar	Kr	Xe
300	0,06	0,04	0,03	0,02	0,008
500	0,13	0,10	0,08	0,04	0,02
700	0,21	0,16	0,14	0,07	0,04
900	0,33	0,25	0,22	0,12	0,06
1100	0,47	0,34	0,30	0,17	0,10
1300	0,63	0,45	0,40	0,23	0,13
1500	0,80	0,57	0,50	0,30	0,18
1700	0,98	0,68	0,62	0,38	0,22
1900	1,18	0,80	0,74	0,42	0,26
2100	1,40	0,95	0,85	0,50	0,30
2300	1,63	1,10	0,98	0,58	0,35
2500	1,90	1,26	1,12	0,65	0,40
2700	2,25	1,45	1,27	0,74	0,45
2900	—	1,62	1,42	0,83	0,52
3100	—	1,85	1,60	0,90	0,57

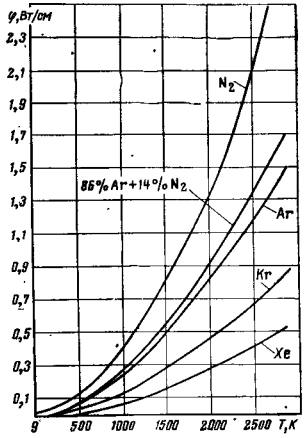


Рис. 7.12. Значение величины φ для различных газов в зависимости от температуры

Для определения толщины застойного слоя b_1 предложен ряд формул. Наиболее широко используется формула Райса[1] [8]

$$b_1=Ad^{0,19}_{т,н}\left[\frac{(T+T_1)^{5/2}\cdot133}{p\,(T+T_1+2C)\sqrt{T-T_1}}\right]^{0,54}, \qquad (7.47)$$

где b_1 — толщина застойного слоя, см; $d_{т,н}$ — диаметр тела накала, см; T и T_1 — соответственно температура нити и средняя температура газа в лампе, К; p — давление газа в лампе, Па, C — постоянная Сезерланда, связанная с вязкостью газа. Значения A и C для некоторых газов приведены в табл. 7.7 [2].

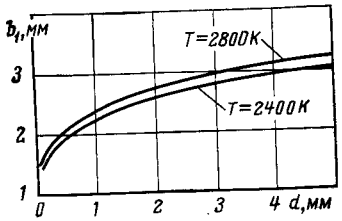


Рис. 7.13. Зависимость толщины застойного слоя от диаметра накаленной нити, работающей в аргоне

На рис. 7.13 приведены зависимости толщины застойного слоя b_1 от диаметра накаленной нити d, работающей в аргоне при давлении 1013 гПа (760 мм рт. ст.) и температурах 2400 и 2800 К. Эти зависимости, построенные по (7.47), могут быть использованы при определении потерь мощности в газе по формуле (7.46).

[1] Строго говоря, формула (7.47) относится к нити, но она с достаточной для практики точностью может применяться и для определения толщины застойного слоя спирального и биспирального тел накала.

Таблица 7.7

Обозначение коэффициентов	Значения коэффициентов для различных газов				
	N_2	Ar	Kr	Xe	86%Ar+ +14%N_2
A	0,163	0,163	0,120	0,094	0,163
C, °C	110	170	188	252	164

7.4. ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ ТЕЛА НАКАЛА ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Выбрать конструкцию тела накала это значит определить (учитывая рассчитанные диаметр и длину нити) кратность спирализации нити, значения диаметра и шага спирали, форму тела накала. Прямолинейное тело накала в настоящее время применяется уже весьма редко и только в вакуумных лампах. Моноспираль широко используется как в вакуумных, так и в газополных лампах в силу ряда достоинств (§ 7.1). Биспиральное тело накала применяется в тех газополных лампах, в которых особенно велики относительные потери мощности через газ.

Опыт разработки и производства ламп накаливания позволяет дать более конкретные рекомендации о выборе кратности спирализации. Для лампы мощностью 25 Вт и меньше на напряжение 127—220 В целесообразно выбирать моноспиральное тело накала, а лампа должна быть вакуумной. Для лампы мощностью от 40 до 100 Вт на напряжение 127—220 В тело накала целесообразно делать биспиральным, а в качестве окружающей тело накала среды брать технический аргон или криптон. Для лампы на напряжение 127—220 В мощностью 150 Вт и больше тело накала обычно делают моноспиральным и наполняют лампу техническим аргоном. Если в задании на проектирование указана световая отдача лампы при сроке службы, равном или большем 1000 ч, то вид тела накала (спираль, биспираль) и характер наполнения лампы (вакуум, аргон, криптон и др.) можно выбрать такие же, как у близких по напряжению и мощности стандартных ламп по ГОСТ 2239-79 «Лампы накаливания электрические общего назначения».

Коэффициент сердечника k_c и шага $k_ш$, определяющие диаметр и длину спирали, устанавливают, руководствуясь следующими основными соображениями. При слишком большом k_c снижается формоустойчивость спирали, появляется склонность к провисанию при высоких температурах и механических нагрузках. При слишком малом k_c увеличивается длина спирали, что требует увеличения парка спирализационных машин, чаще возникают обрывы проволоки при спирализации в связи с возрастанием деформации проволоки на изгиб, у газополных ламп увеличиваются тепловые потери через газ. Практически значение k_c выбирают в пределах от 1,8 до 6. Его следует выбирать ближе к верхнему пределу для спиралей газополных ламп (при этом снижаются потери в газе), а также для спиралей вакуумных ламп концентрированного излучения с нормальной механической прочностью. Значение k_c нужно выбирать ближе к нижнему пределу для спиралей тех ламп, к которым предъявляются высокие требования по механической прочности.

Коэффициент шага спирали $k_ш$ выбирают обычно в пределах от 1,3 до 1,7. При излишне большом $k_ш$ спирали спутываются при их обработке, хранении и монтаже. При малом $k_ш$ повышаются требования к точности спирализации, так как даже небольшие нарушения режима навивки вызывают дефекты шага, приводящие к перегреву отдельных участков спирали.

Для биспиралей обычно принимают следующие значения коэффициентов сердечника и шага первичной и вторичной спиралей: $k_{c1}=1{,}7\div2{,}0$; $k_{c2}=1{,}8\div2{,}6$; $k_{ш1}=1{,}4\div1{,}8$; $k_{ш2}=1{,}6\div2{,}0$. Как видно, для первичных спиралей биспиральных ламп принимается несколько больший коэффициент шага, чем для спиралей моноспиральных ламп. В противном случае в процессе изготовления вторичной спирали повысилась бы по сравнению с моноспиралью опасность замыкания витков первичной спирали и перегорания тела накала с появлением электрической дуги.

Возможность перегорания ламп с явлением дуги возрастает с увеличением *градиента напряжения*, т. е. отношения напряжения на лампе к суммарной длине всех промежутков между витками спирали. Он определяется для моноспиральных ($G_{сп}$) и биспиральных ($G_{бсп}$) ламп по соотношениям

$$G_{сп}=U/(l_{сп}-Nd);\quad G_{бсп}=U/(l_{бсп}-N_2d_1), \tag{7.48}$$

где U — напряжение на лампе, В; $l_{сп}$ и $l_{бсп}$ — длины спирали и биспирали, мм; N и N_2 — общее число витков моноспирального тела накала и вторичной спирали биспирального тела накала; d и d_1 — диаметр вольфрамовой нити и наружный диаметр первичной спирали, мм. Экспериментально показано, что значение градиента напряжения дол-

жно лежать в пределах: для моноспиральных ламп на 127 В — от 3 до 7 В/мм, на 220 В — от 7 до 10 В/мм; для биспиральных ламп на 127 В — от 14 до 17 В/мм и на 220 В — от 17 до 20 В/мм [9].

При выбранных коэффициентах сердечника и шага по формулам (7.3) и (7.4) определяют диаметр и длину спирали (биспирали), которые во многом определяют способ крепления спирали в лампе, вид ножки, форму линзы, количество и размер держателей и др.

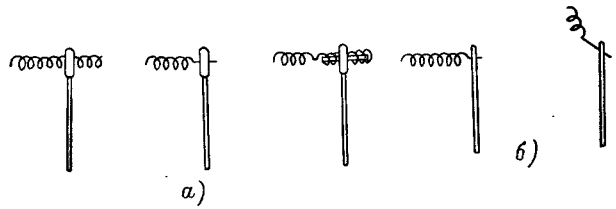


Рис. 7.14. Способы присоединения тела накала к вводам

Для подведения к телу начала напряжения его концы присоединяются к электродам (вводам) зажимом в предварительно расплющенных электродах (рис. 7.14,*а*) или точечной электроприваркой (рис. 7.14,*б*). Поэтому к расчетной рабочей длине нити (спирали) нужно вводить добавку, расходуемую на крепление тела накала к вводам. При небольшой длине тело накала крепится только к электродам (у низковольтных ламп до 12 В). Некоторые низковольтные лампы снабжают одним-двумя держателями, вплавляемыми в лопатку или бусинку ножки. При увеличении размеров спирали увеличивается число держателей и они вплавляются в укрепленную на штабике линзу (см. рис. 5.6).

Выше, говоря о вольфрамовой нити, спирали, биспирали, их часто называли телами накала. Это было удобно для изложения, но не совсем точно. Спираль (биспираль и др.), строго говоря, только тогда становится телом накала, когда приобретет законченную форму, жестко закрепится на ножке лампы и будет готова выполнять рабочие функции. В зависимости от назначения лампы, ее размеров и других особенностей тела накала могут иметь различные формы (рис. 7.15). Однако общей тенденцией, о которой говорилось в § 7.1 и которая ясно просматривается на рис. 7.15, является стремление к компактности. Такая тенденция обусловлена не только светотехническими, физическими и

экономическими требованиями (§ 7.1), но и рядом конструктивных соображений. Например, тело накала не может быть больше диаметра горла колбы лампы, если этот диаметр задан; оно должно быть существенно меньше диаметра колбы, чтобы не вызвать ее перегрева, и др.

Выбор формы тела накала и способа фиксирования его в пространстве требует учета ряда факторов. Если спираль короткая, то естественно тело накала делать прямым (рис. 7.15,*а*, *б*). Длинная нить или спираль оформляются в зигзагообразное тело накала (рис. 7.15,*ж*—*к*). Такое тело накала эффективно также в лампах, предназначенных для

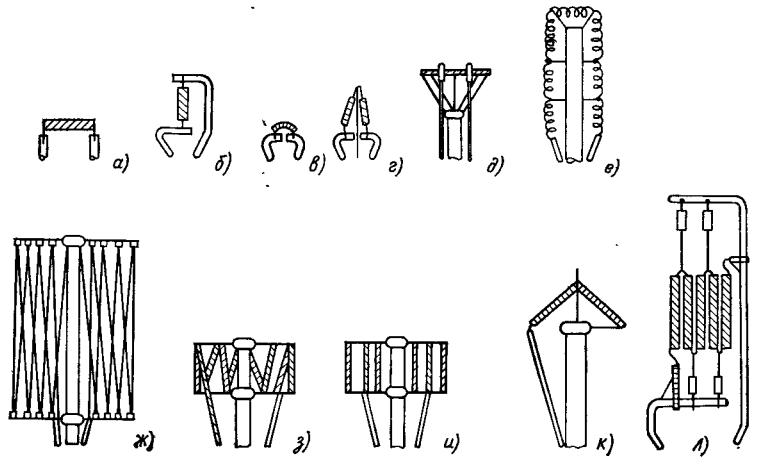


Рис. 7.15. Наиболее распространенные формы тела накала

эксплуатации при повышенных механических нагрузках. Для ламп, применяемых в прожекторных и проекционных установках, тело накала должно представлять собой площадку с минимальными промежутками между секциями спирали; это обеспечивает требуемую высокую габаритную яркость (рис. 7.15,*л*). Если лампа должна иметь цилиндрическую колбу малого диаметра, то наилучшей следует признать форму тела накала, показанную на рис. 7.15,*е*. При выборе формы тела накала для новой создаваемой лампы конструктору следует прежде всего проанализировать все многообразие имеющихся форм и это может оказаться достаточным для принятия решения.

У ламп, предназначенных для работы при повышенных механических нагрузках, телу накала придаются такие размеры и форма, чтобы частота его собственных колебаний была как можно более высокой. При этом удается избе-

жать резонансных явлений (§ 5.3). Частота f собственных колебаний моноспирального тела накала, жестко закрепленного с обоих концов, зависит от размеров спирали:

$$f = asd/l^2_{сп}d_{сп}, \qquad (7.49)$$

где a — коэффициент пропорциональности.

При конструировании тела накала важно правильно выбрать конструкционные материалы. Главным исходным материалом является вольфрамовая проволока соответствующих марок (§ 2.1 и 7.1). Для сердечника применяют молибденовую и стальную проволоки. Молибденовая проволока более тугоплавка, прочна и однородна по диаметру, чем стальная. Поэтому спирали, подлежащие высокотемпературной обработке на сердечнике, спирали из тонкой проволоки с малыми диаметром сердечника и шагом, а также предназначенные для ламп с жесткими допусками по световым и электрическим параметрам, изготавливают на молибденовом сердечнике, а другие спирали, особенно для мощных ламп, — на стальном. Конструируя тело накала, необходимо учитывать особенности технологии. Например, спираль теряет в весе (в диаметре) при травлении; вольфрамовая нить и сердечник вытягиваются при спирализации; в какой-то мере нарушается шаг спирали при монтаже ее на ножку и др. Необходимо стремиться также к тому, чтобы выбранная конструкция тела накала поддавалась монтажу на существующем механизированном оборудовании и не была слишком трудоемкой.

Приведенные рекомендации количественного характера (границы значений коэффициентов шага и сердечника, ограничения по значению градиента напряжения и т. п.) не являются абсолютными. Если, к примеру, будут созданы высокоточные машины спирализации и новые марки более формоустойчивого вольфрама, то значение коэффициента шага спирали можно будет брать существенно ниже того предела, за который не рекомендуется выходить в настоящее время.

Глава восьмая

КОНСТРУИРОВАНИЕ НОЖЕК ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

8.1. НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО НОЖЕК ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Ножкой называют цельный, неразъемный конструктивный узел лампы (рис. 8.1), включающий в себя стеклянные штабик *1*, штенгель *2*, тарелку *3* и электроды *4*, соединенные в единую конструкцию расплавлением и последующей формовкой концов стеклянных элементов в виде лопатки *5*. Во многих случаях ножку оснащают различными крепежными и вспомогательными деталями: держателями спирали; стеклянными и керамическими мостиками и изоляторами, также предназначенными для крепления тела накала; тепловыми и светоперераспределяющими экранами и отражателями и др. Будучи размещенными на ножке, они становятся ее неотъемлемыми частями.

Ножка лампы выполняет следующие функции. Она обеспечивает сохранение установленной формы тела накала и поддерживает его в заданной зоне пространства внутри лампы. Через закрепленные в ножке электроды осуществляется подвод тока к телу накала. Через штенгель и откачное отверстие *9* осуществляются откачка и наполнение лампы газом. Ножка вместе с колбой обеспечивает герметизацию лампы, изолирование внутреннего пространства ее от окружающей среды (§ 5.1). Ножка удерживает на себе различные вспомогательные детали и устройства, обеспечивающие решение ряда технологических, светотехнических и других задач, связанных с функционированием лампы.

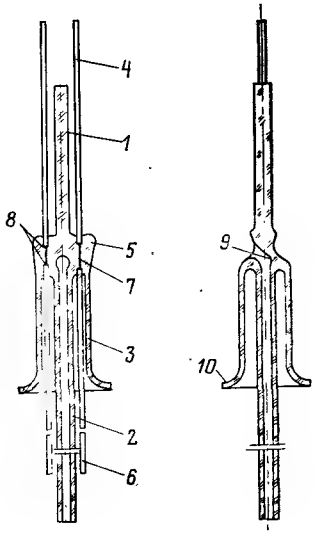


Рис. 8.1. Устройство гребешковой ножки:

1 — штабик; *2* — штенгель; *3* — тарелка; *4* — электроды; *5* — лопатка; *6* — выводы; *7* — впаи; *8* — узлы впаев; *9* — откачное отверстие; *10* — развертка тарелки

По конструктивному исполнению ножки разделяются на три группы (рис. 8.2): гребешковые, бусинковые, плоские. Подавляющее большинство ламп накаливания снабжают гребешковыми ножками (рис. 8.2,*а*—*г*), которые чаще всего имеют штенгель, штабик, тарелку и электроды. На верхней части штабика обычно формуется линза для закрепления держателей (рис. 8.2,*г*). Как видно из рис. 8.2,*б*, вместо раздельных штабика и штенгеля иногда применяют длинный (сквозной) штенгель, часть которого выполняет роль штабика. Ножки для ламп на низкое напряжение с коротким телом накала изготовляют без штабика (рис. 8.2,*а*, *в*) с одним-двумя держателями, вставленными в торец лопатки ножки, или без держателей. Ножки для двухсветных

ламп изготовляют с тремя электродами (рис. 8.2,*в*), а для софитных — с одним. Гребешковые ножки без штабика применяются также для ламп, в которых держатели вставляются в мостики, располагаемые между вводами, что имеет место, например, в прожекторных и проекционных лампах.

Ножки бусинкового типа (рис. 8.2,*д*) применяются в миниатюрных и сверхминиатюрных лампах. Как видно, они

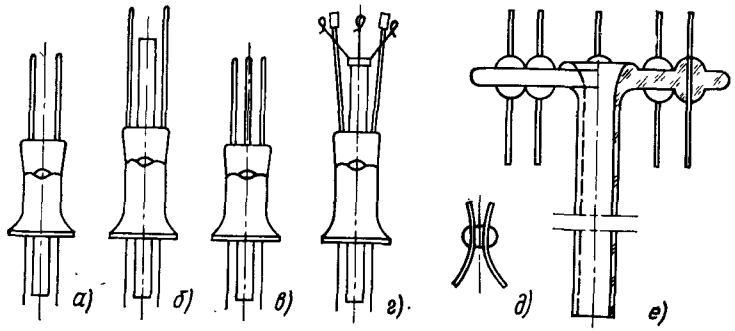


Рис. 8.2. Основные виды ножек

представляют собой стеклянную бусинку со впаянными в нее электродами. Иногда в бусинку вплавляются один-два держателя. В случае бусинковой ножки откачка воздуха из лампы производится либо через отдельный штенгель, спаиваемый встык с колбой и после откачки отпаиваемый (в миниатюрных лампах — рис. 8.3,*а*), либо через штенгель, служащий одновременно колбой, с торцом которого сваривается бусинка (в сверхминиатюрных лапах — рис. 8.3,*б*).

Плоские ножки (рис. 8.2,*е*) применяются реже, в основном для некоторых типов специальных ламп с небольшой высотой светового центра. Они представляют собой стеклянное прессованное плоское тело с впаянными электродами и отверстием в центре, к кромкам которого герметично приваривается штенгель. Выво-

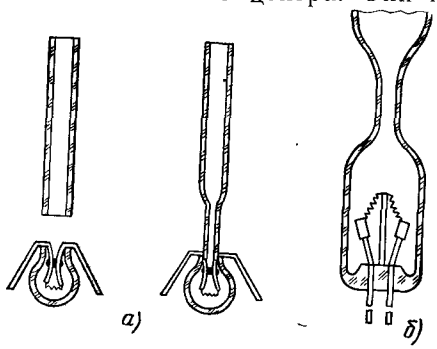


Рис. 8.3. Схемы заварки и откачки лампы с бусинковой ножкой

ды ламп с плоской ножкой (а их может быть несколько — в этом важное преимущество такой ножки) служат одновременно штырьками для присоединения ламп к панели или патрону.

При конструировании ножки и выборе ее элементов нужно обеспечить ряд требований. Прежде всего спай электродов со стеклом в ножке должен быть не только механически прочным, но и вакуумно-плотным. Между поверхностью электрода (впаем) и прилегающим к нему стеклом не должно быть каналов, пропускающих газы, ни в «холодном» состоянии лампы, ни в рабочем режиме. Это требование должно быть в значительной мере удовлетворено уже на стадии конструирования ножки путем выбора металла для впая электродов и стекла с близкими коэффициентами расширения, с хорошей смачиваемостью металла стеклом и др. Герметичными и лишенными внутренних напряжений должны быть не только спаи «металл — стекло», но и спаи «стекло — стекло» (сварка тарелки с колбой, штенгеля и штабика с тарелкой и др.), а также место отпая штенгеля. Для этого важно подобрать соответствующие (согласованные, подходящие друг к другу по коэффициенту расширения) марки стекол и размеры стеклянных деталей.

Ножка является электротехническим устройством, причем, как правило, с относительно малыми расстояниями между токоведущими частями. Поэтому при конструировании нужно выбрать эти расстояния такими (с учетом напряжения на лампе, диэлектрических свойств стекла и других факторов), чтобы при работе лампы не возникало утечек тока и коротких замыканий между токоведущими элементами ножки.

Некоторые элементы ножки при изготовлении и эксплуатации подвергаются существенным механическим нагрузкам (штенгели — при вставлении ламп в гнездо откачной установки; штабики, электроды, держатели — при транспортировании на стадиях изготовления и эксплуатации ламп и др.). При недостаточной прочности и устойчивости крепежных и других элементов ножки может произойти или разрушение ее, или деформация, смещение тела накала. Чтобы противостоять указанным нагрузкам, нужно при конструировании ножек подобрать соответствующие материалы, выбрать рациональные размеры деталей.

8.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ И КОНСТРУКЦИИ СТЕКЛЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НОЖЕК

Как уже отмечалось, основными стеклянными элементами, из которых собирается ножка, являются штабик, штенгель и тарелка. Они называются так же и после сборки их в ножку, хотя вид их и размеры при этом не остаются прежними (см. рис. 8.1). Штабик и штенгель могут стать в ножке несколько короче за счет спаивания с тарелкой; на свободном конце штабика (не спаянном с тарелкой) обычно отформовывается линза для вставления крючков; существенно деформируется тарелка — неразвернутый конец ее расплющивается в разогретом состоянии в виде лопатки, сплавляясь со штенгелем и штабиком в одно целое. В связи с этим в чертежах на штабики, штенгели и тарелки (как на полуфабрикаты) указываются одни размеры, а в чертежах на ножку размеры этих же элементов (но ставших уже частями ножки) становятся несколько другими. Соответствие между теми и другими размерами легко установить, если знать применяющуюся при изготовлении ножек технологию и оснастку.

Штабик — это часть ножки, на которой укрепляется тело накала лампы. Он представляет собой стеклянный стержень или стеклянную трубку, на свободном конце которых часто отформовывается линза. В линзу одновременно с ее формовкой или после формовки (в зависимости от принятой технологии) вставляются держатели спирали.

Размеры штабика определяются исходя из следующих соображений. Диаметр штабика должен быть минимальным, но вместе с тем таким, чтобы обеспечивалась необходимая прочность его, определяемая заданными механическими нагрузками на лампу, и чтобы можно было отформовать на нем необходимых размеров линзу. Длина штабика (в ножке) должна обеспечивать вместе с тарелкой и цоколем заданную для лампы высоту светового центра h (см. рис. 5.13) или расположение тела накала примерно в центре колбы, если размер h строго не задан. Таким образом, длина штабика может быть подсчитана посредством элементарных арифметических действий.

Штенгели. Расчет пропускной способности штенгеля. Во время изготовления лампы штенгель ножки служит элементом вакуумной системы, связывающим внутреннее пространство лампы с вакуумным насосом. Через него происходит откачка воздуха из лампы, промывка ее газом и наполнение. После завершения вакуумных операций благодаря запайке (отпайке) штенгеля надежно и окончательно

прекращается связь внутрилампового пространства с окружающей средой. В качестве штенгеля ламп накаливания в подавляющем большинстве случаев применяются стеклянные цилиндрические трубки круглого сечения, длина которых L значительно больше диаметра D. Между длиной и диаметром штенгеля обычно соблюдается соотношение $(L/D) \geqslant 20$.

При определении размеров штенгеля исходят из следующих основных требований. Внутренний диаметр и длина штенгеля должны быть такими, чтобы обеспечивались наилучшие условия для откачки и наполнения лампы. Толщину стенки трубки и ее диаметр нужно выбрать с учетом необходимости получить качественный герметичный отпай штенгеля, а также прочное соединение его с тарелкой в зоне откачного отверстия. В случае, когда штенгель одновременно выполняет роль штабика, его размеры должны обеспечивать возможность формования линзы нужных размеров. При оценке размеров линзы нужно исходить из того, что держатели должны вставляться в линзу на глубину не менее 0,5 мм, расстояние между концами смежных держателей в линзе должно быть 1—2 мм, а между концами противоположных — 3—4 мм. Длина штенгеля должна обеспечивать удобное вставление лампы в гнезда откачных установок.

Рассмотрим подробнее первое требование. Чтобы выбрать штенгель, обеспечивающий наилучшие условия откачки, нужно знать прежде всего, какой объем газа необходимо через него откачать (его легко подсчитать, если известен диаметр колбы лампы) и за какое время это нужно сделать (оно может быть задано, например, по принятому уровню производительности труда или скорости откачных автоматов). Отношение потока газа в штенгеле (Q, м^3·Па/с) к движущей разности давлений по концам штенгеля ($p_1 - p_2$, Па) равно пропускной способности (проводимости) искомого штенгеля U, выражаемой обычно в м^3/с. Задача заключается теперь в том, чтобы по заданным проводимости штенгеля U и его длине L найти диаметр штенгеля D или по заданным U и D найти длину штенгеля L.

Теория расчета вакуумных систем дает необходимые соотношения для определения проводимости вакуумпроводов разных диаметров и длин при различных режимах течения газов. Например, при *вязкостном* режиме течения воздуха при 20°С (вакуум относительно низкий; отношение свободного пути молекулы газа к диаметру вакуумпровода

$\lambda/D \leqslant 5\cdot 10^{-3}$; определяющим фактором в течении газа является его вязкость) справедливо соотношение [31]

$$U_в = 1{,}36\cdot 10^3 \frac{D^4}{L}\,\frac{p_1+p_2}{2}, \qquad (8.1)$$

где $U_в$—проводимость трубки; p_1 и p_2—давление в откачиваемом объеме и у входа в насос, Па; D и L — диаметр и длина трубки, м.

Для любого другого газа при вязкостном режиме

$$U'_в = U_в\sqrt{M/M'}\;\lambda_1/\lambda'_1 = \frac{\pi D^4}{128\eta L}\,\frac{p_1+p_2}{2}, \qquad (8.2)$$

где M и M' — молекулярные массы воздуха и данного газа, кг/кмоль; λ_1 и λ'_1 — соответствующие средние длины свободного пути молекул при давлении, равном единице, м; η — коэффициент вязкости газа, Па·с.

При *молекулярном* режиме течения при 20 °С (высокий вакуум; $\lambda/D \approx 1{,}5 \div \infty$; молекулы перемещаются по трубке независимо друг от друга) проводимость трубки для воздуха

$$U_м = 1{,}21\cdot 10^2 D^3/L, \qquad (8.3)$$

а для других газов при молекулярном режиме течения

$$U'_м = U_м\sqrt{M/M'} = 38{,}1\,\frac{D^3}{L}\sqrt{T/M}. \qquad (8.4)$$

где T — температура газа, К.

Проводимость трубки при *молекулярно-вязкостном* режиме течения воздуха при 20 °С (средний вакуум; $\lambda/D = 5\cdot 10^{-3} \div 1{,}5$; наряду с вязкостью сказывается и независимое движение молекул) определяется по формуле

$$U_{м,\,в} = U_м\cdot b + U_в = 1{,}21\cdot 10^2 (D^3/L) b + 1{,}36\cdot 10^3 D^4/L\,\frac{p_1+p_2}{2}. \qquad (8.5)$$

Применительно к любым газам при молекулярно-вязкостном режиме течения справедливо соотношение

$$U'_{м,\,в} = U'_м b + U'_в = 38{,}1\,\frac{D^3}{L}\sqrt{T/M}\,b + \frac{\pi D^4}{128\eta L}\,\frac{p_1+p_2}{2}. \qquad (8.6)$$

Из (8.5) и (8.6) следует, что проводимость трубки при среднем вакууме равна сумме проводимостей при высоком вакууме (с поправкой в виде коэффициента b, учитывающего среднее давление в трубке) и при низком вакууме. (При низких давлениях $b=1$, а при высоких $b=0{,}8$.) Таким образом, соотношения (8.5) и (8.6) охватывают значения проводимостей при высоком, среднем и низком вакууме. Формулы (8.1) — (8.6) справедливы при $L/D \geqslant 20$.

При расчете проводимости штенгелей ламп накаливания во всех случаях можно пользоваться формулой (8.6). Откачка вакуумных ламп накаливания, отпаиваемых с давлением 3—4 Па (2—$3\cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.), идет при молекулярно-вязкостном режиме. Поэтому для расчета проводимости штенгелей этих ламп наиболее подходит формула (8.5). Для менее точных оценок допустимо вести расчет и по более простой формуле (8.1); при этом ошибка возрастает приблизительно на 5%. Эти же формулы можно применять при расчете штенгелей газополных ламп, так как перед наполнением они откачиваются до такого же давления, как и вакуумные.

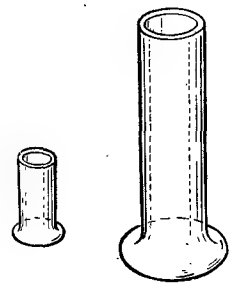


Рис. 8.4. Тарелки для гребешковых ножек

Названные выше другие (кроме проводимости) требования к штенгелям могут быть реализованы на основе тесного контакта с технологами, полного учета особенностей и возможностей огневой обработки стекла и технологического оборудования. Если, например, анализ оборудования показал, что для удобного размещения новой лампы на откачном автомате требуется какая-то определенная длина штенгеля, то именно эту длину целесообразно принимать при расчете проводимости или диаметра штенгеля.

Тарелки. Тарелкой называют короткую стеклянную трубку с конусообразным расширением (разверткой, развальцовкой) с одной стороны (рис. 8.4). Она является центральным элементом ножки, связывающим в зоне лопатки все ее составные части. Благодаря тарелке, развертка которой сплавляется с горлом колбы, ножка приобретает определенное, фиксированное положение в колбе.

Размеры тарелки определяются в основном размерами лампы, зависящими, в свою очередь, от ее мощности. Например, чем мощнее лампа, тем больше должен быть диаметр трубки тарелки, так как это позволит обеспечить большее расстояние между электродами в лопатке. Диаметр развертки тарелки устанавливается в зависимости от диаметра горла колбы. Зазор между разверткой тарелки и колбой должен быть небольшим, около 10 % диаметра горла. Это необходимо для качественной заварки лампы.

Длина тарелки может быть выбрана из тех же соображений, которые использовались при определении длины штабика (суммарная длина штабика, тарелки и цоколя лампы с учетом частичного перекрытия тарелки цоколем должна соответствовать высоте светового центра или обеспечивать размещение тела накала в центре колбы).

При выборе толщины стенок штенгелей и тарелок необходимо учитывать размеры лампы, условия ее эксплуатации (будут, например, механические нагрузки или нет), а также технологические возможности огневой обработки стекла. Толщины стенок стеклянных деталей, предназначенных для сварки друг с другом, должны быть примерно одинаковыми. Нужно также учитывать существующий сортамент стекла (размерный и рецептурный ряд выпускаемого трубчатого и стержневого стекла) и не выходить за его пределы. Иначе говоря, нельзя использовать при разработке лампы стекла таких размеров, которые не выпускаются. Это относится также ко всем другим материалам.

Выбор стекла для ножек. Наличие в ножке ответственных спаев металл — стекло и стекло — стекло требует внимательного отношения к выбору марок стекла (см. табл. 2.1). Стекло следует выбирать соответственно материалу впаиваемого среднего звена электрода. Если звено изготовлено из платинита, что имеет место в ножках всех ламп накаливания общего назначения и многих специальных ламп, то для ножек должно быть применено стекло платинитовой группы — СЛ 97-1. Это обеспечивает качественный вакуумный спай. Для ламп, работающих при относительно большом токе в напряженном тепловом режиме, ножки делают с электродами, имеющими тугоплавкие молибденовые или вольфрамовые впаи. В этом случае нужны стекла соответственно молибденовой и вольфрамовой группы. Ножки мощных ламп накаливания со специальной конструкцией впаев изготавливают с применением переходных стекол СЛ 58-1 и СЛ 86-1.

Основные физические параметры стекол, применяемых для изготовления спаиваемых друг с другом деталей, должны быть близкими друг к другу. Это относится прежде всего к температурному коэффициенту линейного расширения и вязкости при верхнем значении температуры обработки. Температура размягчения стекла ножек может быть ниже, чем у колб. Поскольку при сваривании ножек с колбой нагрев осуществляется со стороны колбы, то указанная разница температур обусловливает более равномерное размягчение стекла ножки и колбы и лучшее их спаивание.

8.3. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Электроды — это электропроводящие элементы ножки, состоящие из нескольких проволок, соосно соединенных между собой электрической или газовой сваркой.

Главное назначение электродов — подвести напряжение к телу накала. В работающей лампе электроды являются частью электрической цепи: источник питания (электросеть) — цоколь — электрод — тело накала — электрод — цоколь — источник питания. В связи с этим для изготовления электродов применяют проволоки, хорошо проводящие электричество.

Электроды выполняют также другие функции. Будучи прочно соединенными с концами спирали, они вместе с держателями удерживают тело накала в заданном положении. Кроме того, на электродах внутри лампы размещаются некоторые крепежные и вспомогательные детали.

Как видно из рис. 5.6, каждый из электродов работает одновременно в трех средах, существенно отличающихся друг от друга (в лампе, вне лампы, в стекле). Причем в каждой из них электрод выполняет свои специфические функции. Это предопределило в основном многозвеньевую конструкцию электродов (рис. 8.5). Большинство электродов состоит из трех сваренных друг с другом звеньев: внутреннего, находящегося в лампе между телом накала и лопаткой ножки (ввод); наружного, располагающегося вне лампы между лопаткой ножки и цоколем (вывод), и среднего, вплавленного в лопатку ножки и находящегося между вводом и выводом (впай). Каждое звено имеет свои размеры и изготавливается из специально подобранных материалов, удовлетворяющих условиям работы и заданным функциям.

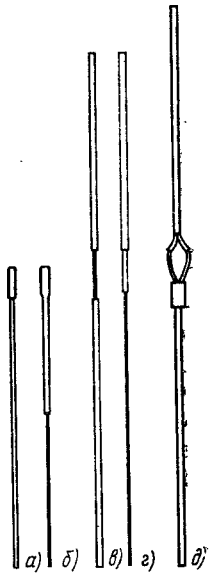


Рис. 8.5. Электроды для ламп накаливания

а — однозвеньевой; *б* — двухзвеньевой; *в* — трехзвеньевой; *г* — трехзвеньевой с плавким предохранителем; *д* — специальный электрод с двойным впаем

Внутренние звенья работают в вакууме или инертном газе, в последнем случае они значительно нагреваются

потоками горячего газа. Верхние части вводов нагреваются до высокой температуры контактирующим с ними телом накала. Вводы испытывают механические нагрузки при изготовлении ламп, транспортировке и эксплуатации. Поэтому от вводов требуется, чтобы они были достаточно жесткими и формоустойчивыми и относительно теплостойкими. Кроме того, они не должны выделять при нагреве каких-либо веществ, ухудшающих вакуум или загрязняющих газовую среду внутри лампы. Хорошо отвечает этим требованиям никелевая проволока, которая широко применяется для вводов в газополных лампах. В вакуумных лампах, где электроды не нагреваются так сильно, для вводов используется медная проволока.

При определении длины вводов исходят из заданных длины лампы, высоты светового центра и размеров тарелки. Принимают во внимание также следующие обстоятельства: очень длинные и тонкие вводы деформируются при механических нагрузках на лампу и повреждают тело накала; излишне короткие вводы могут настолько приблизить тело накала к ножке, что появятся перегрев, газоотделение и электролиз стекла.

Диаметр никелевых вводов принимают таким, чтобы значения плотности тока находились в пределах 2—8 А/мм^2, а температура вводов вблизи тела накала в работающей лампе не превышала 700 °С. По соображениям механической прочности диаметры вводов обычно принимаются выше полученных по электротехническим расчетам.

Внешние звенья электродов работают в условиях атмосферного воздуха при относительно низких температурах (даже если лампа работает цоколем вверх). Они не испытывают существенных механических нагрузок, кроме изгибания при выведении электрода на борт цоколя. Поэтому от выводов требуется, чтобы они были гибкими, стойкими против коррозии и имели диаметр, минимально необходимый с электротехнической точки зрения. Лучше всего подходит для выводов большинства ламп накаливания мягкая медная проволока, а для ламп, потребляющих большой ток (больше 15 А), медный многожильный канатик. Обладая хорошей теплопроводностью, медь активно отводит теплоту от впая, снижая нагрев лопатки. Длину выводов определяют, исходя из длины тарелки и высоты цоколя.

Средние звенья располагаются в стекле. Они должны создавать со стеклом вакуумно-плотное соединение, которое бы надежно изолировало внутренний объем лампы от

окружающей среды. Материал впая должен выдерживать высокие температуры при вплавлении его в лопатку ножки и не вызывать в результате периодических нагревов и охлаждений при эксплуатации ламп опасных внутренних напряжений в стекле. Полностью удовлетворяет этим требованиям платина, однако из-за высокой ее стоимости в подавляющем большинстве типов ламп накаливания для среднего звена электродов применяется биметалл — платинит. В интервале 20—300 °С температурный коэффициент расширения платинита в поперечном направлении равен $(80—92)\cdot 10^{-7}$ К$^{-1}$, т. е. близок к таковому у стекла для ножек. Платинит хорошо смачивается стеклом, дает прочные сварные соединения с медью, никелем и ферроникелем, имеет удельное сопротивление 0,04—0,06 Ом·мм^2/м.

Однако недостаточное соответствие продольных температурных коэффициентов расширения платинита и стекла ножки и быстрое расширение платинита от перегрева при больших плотностях тока, которое может вызвать растрескивание стекла, создают некоторые ограничения его применению в качестве впая. Так, выбор диаметра платинита ограничивается областью от 0,25 до 0,8 мм. Платинит тоньше 0,25 мм недостаточно прочен и не дает герметичного спая со стеклом из-за быстрого окисления, а толще 0,8 мм — вызывает опасные напряжения в стекле. Ограничиваются также предельно допустимые токовые нагрузки платинита [9]:

Диаметр платинита, мм	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,8
Предельная токовая нагрузка, А	2,0	4,0	5,8	7,3	8,8	11,6	14,0	16,3

При высоких токовых нагрузках, превышающих указанные выше, можно применять электроды с двумя параллельно соединенными платинитовыми звеньями или заменить платинитовый впай на молибденовый или вольфрамовый. Эти металлы в интервале 20—300 °С имеют близкие с соответствующими стеклами коэффициенты температурного расширения и обеспечивают с ними согласованные впаи.

Для некоторых специальных ламп малого размера применяются двухзвенные электроды: внутреннее звено — никелевое, наружное — платинитовое. В этом случае внешнее звено вплавляется в стекло, т. е. служит одновременно и вакуумным звеном (впаем). Электроды для вакуумных миниатюрных ламп с бусинковой ножкой делаются однозвенными, целиком из платинита.

В § 6.2 отмечалось, что некоторые типы ламп накаливания склонны к перегоранию с явлением электрической дуги. Это относится прежде всего к биспиральным лампам на номинальное напряжение 220 В с криптоновым наполнением, к лампам с концентрированным телом накала. Возникший и активно развивающийся электрический разряд в газе с быстрым нарастанием тока может привести в итоге к разрушению лопатки, колбы и другим отрицательным последствиям. Для того чтобы приостановить развитие этих процессов, внешнее звено одного из трехзвенных электродов или часть его изготавливают из специально подобранной проволоки, служащей плавким предохранителем. Его иногда заваривают в стеклянную трубку, что обеспечивает быстрое гашение дуги, возникающей между концами перегоревшей вставки.

Материал и размеры плавкой вставки нужно выбирать, исходя из следующего. Вставка должна обеспечить нормальную работу лампы и не расплавляться при кратковременных перегрузках пусковым током; вставка должна расплавляться тогда, когда ток короткого замыкания при перегорании лампы с образованием дуги еще не превысил четырех-пятикратного значения номинального тока. При соблюдении указанных условий исключаются случаи ложного срабатывания предохранителя и обеспечивается его срабатывание в самом начале процесса возникновения дуги.

Для плавкой вставки применяют проволоку из константана или ферроникеля. Ее можно изготовить из никелевой стали 42Н (42,5—44 % никеля и 57,5 — 56 % железа), применяемой в качестве сердечника платинита. Проволока из стали 42Н диаметром 0,25 мм плавится при токе 3,8 А, а диаметром 0,2 мм — при 2,9 А.

Размеры плавкой вставки легко рассчитать. Предположим, что имеются отрезки проволоки разных диаметров, длина каждого из которых равна $l_{пр}$ (соответствует длине вывода лампы с рабочим током I). Нужно узнать, какого диаметра d взять образец проволоки, чтобы он расплавился в течение заданного времени t при прохождении через него тока $I_{пл}$.

Известно, что для количества теплоты Q, выделяющейся при прохождении тока $I_{пл}$ по проводнику с сопротивлением R за время t, можно записать следующие соотношения:

$$Q = I^2_{пл} R t = I^2_{пл} 4 \rho l_{пр} t / \pi d^2,$$

$$Q = C(T_{пл} - T_0) = cM(T_{пл} - T_0) = c\,\frac{\gamma l_{пр} \pi d^2}{4}(T_{пл} - T_0),$$

где ρ — удельное сопротивление, Ом·м; C и c — теплоемкость и удельная теплоемкость проволоки, Дж·К$^{-1}$ и Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$; M — масса проволоки, кг; $T_{пл}$ — температура плавления проволоки, К; T_0 — начальная температура, К; γ — удельная масса материала, кг·м$^{-3}$; t — время, с.

Приравнивая эти соотношения и решая полученное равенство относительно d, получаем выражение для искомого диаметра плавкого предохранителя, м:

$$d = \sqrt[4]{\frac{16 I^2_{пл} \rho t}{\pi^2 c \gamma (T_{пл} - T_0)}}. \qquad (8.7)$$

Оценку правильности выбора материала и размеров предохранителя можно легко осуществить на опытных образцах ламп, повышая на них напряжение до перегорания спирали. Предохранитель следует считать выбранным правильно, если он расплавится после перегорания спирали, но до возникновения явно выраженного электрического разряда в лампе, растрескивания лопатки и разрушения лампы.

8.4. КРЕПЕЖНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ДЕТАЛИ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

К основным крепежным и вспомогательным деталям, размещаемым на ножке в лампе, относятся держатели, мостики, экраны.

Держатели (рис. 8.6,*а*) служат для придания телу накала определенной формы и крепления его в лампе, если поддержка тела накала только электродами недостаточна. Они представляют собой прямолинейные детали из проволоки с крючками различной формы на одном из концов. Параметры и количество держателей выбираются в зависимости от мощности лампы, размеров, массы и формы тела накала, его температуры и расположения в лампе, назначения и условий эксплуатации лампы.

Наиболее распространенный материал для держателей — молибденовая проволока. Она достаточно тугоплавка и даже при высокой температуре обладает хорошей упругостью.

Держатели могут изготавливаться как самостоятельные детали. Однако все шире применяется механизированный монтаж, при котором держатели формируются после автоматического вставления отрезка проволоки в линзу штабика. Держатели могут вставляться также в так называемые мостики.

Мостики (рис. 8.6,*б*) применяются в тех слу-

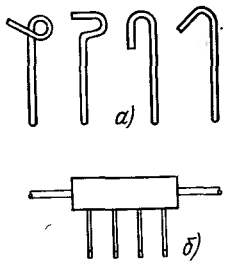


Рис. 8.6. Крепежные и вспомогательные детали ламп:

а — держатели тел накала; *б* — керамический мостик

чаях, когда держатели по каким-то причинам не могут быть размещены на штабике (чаще всего из-за их большого количества или из-за сложности формы тела накала). Мостик представляет собой стеклянный или керамический элемент той или иной формы с заделанными в него держателями, а также другими деталями, необходимыми для закрепления самого мостика на ножке лампы. Изображенные на рис. 8.6,*б* боковые стерженьки служат для приварки мостика к вводам ножки. Стеклянные мостики применяются для маломощных ламп, керамические — для мощных.

Применение мостиков позволяет, с одной стороны, создавать новые и сложные формы тел накала, а с другой — снижает возможность механизации и автоматизации сборки ножек и монтажа тела накала. Поэтому применение мостиков должно быть технико-экономически обосновано.

Экраны в лампах накаливания применяются для решения двух основных задач: защиты отдельных частей лампы (чаще всего цоколя и лопатки ножки) от перегрева прямым потоком излучения тела накала и конвекционными потоками наполняющего лампу газа; экранировки и перераспределения светового потока тела накала в пространстве. В последнем случае экраны называются отражателями.

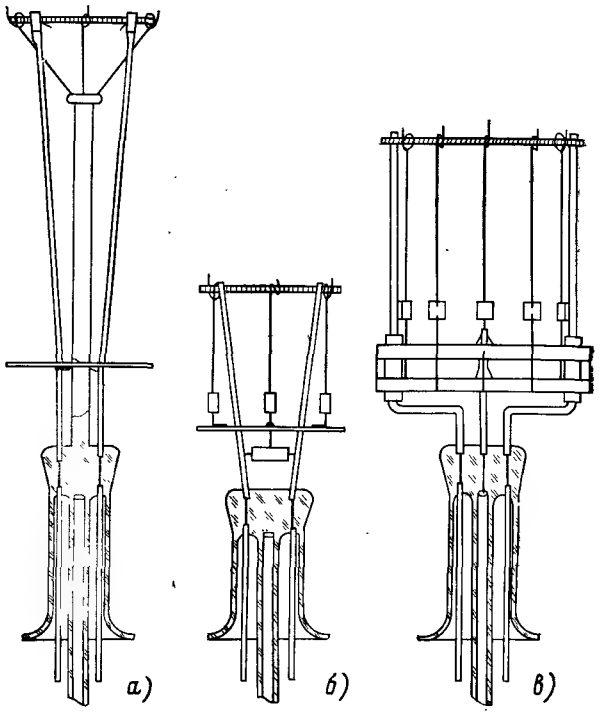


Рис. 8.7. Способы крепления на ножке тепловых экранов:
а — слюдяного; *б*, *в* — металлических

Тепловые экраны применяют главным образом в лампах общего назначения мощностью 500 Вт и выше и в зеркальных лампах мощностью 150 Вт и выше для предохранения от перегрева цоколя при работе лампы в положении цоколем вверх (перегрев цоколевочной мастики может вызвать ее разрушение и отделение цоколя). Перераспределяющие свет экраны-отражатели находят широкое применение в автомобильных, кинопроекционных и ряде других, преимущественно специальных, лампах.

Тепловые экраны изготавливаются плоскими, чаще всего они выштамповываются из листов слюды, а также из металла. Экраны-отражатели разнообразной формы выполняются штамповкой из никеля (если экран расположен относительно далеко от тела накала и не перегревается наполняющим газом) или молибдена (если температурные условия более тяжелые).

Размещение экранов на ножке может быть осуществлено различными конструктивными приемами (рис. 8.7, рис. 5.7,*в*, *г*). Например, для крепления слюдяного теплового экрана его надевают на штабик и вводы и затем зажимают двумя плоскими никелевыми поддержками, привареными к вводам. Слюдяной экран можно крепить на ножку также путем предварительного разогрева штабика до размягчения, а затем опрессовки надвинутого на штабик экрана стеклом с двух сторон.

Металлические экраны разного назначения крепят преимущественно с помощью разнообразных никелевых и молибденовых поддержек, вставленных в лопатку ножки или в штабик, а также привариваемых к вводам, с изоляцией последних от экрана керамическими мостиками. Плоский металлический экран может быть одет на лопатку ножки при наличии специально выполненных прорезей в экране. Металлические экраны, естественно, должны быть смонтированы так, чтобы они не касались токоведущих частей ножки.

8.5. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НОЖКЕ С ТЕЛОМ НАКАЛА

Ножку называют *смонтированной*, если она имеет тело накала и другие элементы, т. е. подготовлена для заварки в колбу. Под монтажом тела накала на ножку следует понимать процесс придания ему определенной формы и фиксирования этой формы в пространстве с помощью элементов ножки (электродов, держателей и др.).

Качество ножек с телом накала должно задаваться уже на стадии конструирования. Конструирование смонтированных ножек заключается в выборе положения тела накала относительно ножки и других элементов лампы и способов соединения его и экранов с элементами

ножки посредством держателей, мостиков и других деталей. При решении этой задачи необходимо учитывать ряд требований.

Расположение тела накала относительно ножки и других частей лампы определяется заданными высотой светового центра или расстояниями от каких-либо деталей лампы. Часто в задании на разработку лампы указываются только требуемые светотехнические и теплотехнические параметры и тогда высоту светового центра или координаты тела накала в лампе определяет сам конструктор.

Если лампа должна создавать определенным образом направленное излучение, то следует расчетом или экспериментально подобрать соответствующий перераспределяющий свет экран и определить необходимое взаимное расположение тела накала и экрана. В этом случае иногда приходится прибегать к светотехническим расчетам.

При определении положения тела накала в лампе во всех случаях нужно придерживаться правила: оно должно находиться на достаточном расстоянии от стеклянных деталей лампы, чтобы не вызвать их перегрева, сопровождающегося повышенным выделением газов из стекла или электролизом стекла в линзе или лопатке.

В чертежах на смонтированную ножку должны быть указаны расположение электродов (расстояние между ними и их положение относительно штабика), количество держателей и угол подъема их по отношению к плоскости линзы. При этом держатели должны несколько натянуть спираль, однако не более чем на 3—4% первоначальной длины, а участки спирали между держателями должны быть примерно одинаковыми. Форму крючков держателей нужно выбирать такой, чтобы они закорачивали минимальное количество витков спирали и не врезались в промежутки между ними.

Выбранный конструктором способ крепления тела накала к электродам должен обеспечивать их надежный механический и электрический контакт (см. § 7.4). В лампах накаливания общего назначения это хорошо обеспечивается путем зажима спирали в предварительно расплющенных электродах. Конец спирали, подлежащий зажиму, в большинстве случаев делается не спирализованным и называется «тире», во многих случаях он остается спиралью (для маломощных ламп) или спиралью со вставленным в нее отрезком вольфрамовой проволоки (для специальных мощных ламп). Спирали низковольтных ламп в большинстве случаев изготавливаются с «тире» и присоединяются к электродам точечной электросваркой. Зажимаемые или привариваемые концы тела накала должны несколько выступать за пределы электродов, но не более чем на 1 мм. У спиралей с «тире» крайние витки должны отстоять от вводов на расстояние 1—2 мм.

Глава девятая

КОЛБЫ И ЦОКОЛИ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

9.1. НАЗНАЧЕНИЕ КОЛБ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НИМ. МАТЕРИАЛ КОЛБ

Колбы большинства ламп накаливания — это стеклянные баллоны разной формы, в которые впаивают смонтированные ножки. На рис. 9.1 приведены части и обозначения основных размеров колбы.

Назначение колбы — надежно защищать тело накала от атмосферного воздуха; в максимальной степени пропускать оптическое излучение в течение всей жизни лампы; выполнять роль конструктивного остова лампы, связывая с собой заданным образом ножку и цоколь; в ряде случаев обеспечивать функции оптической системы; выполнять некоторые эстетические функции.

Чтобы соответствовать своему назначению, колба и ее материал должны удовлетворять ряду требований. Это — прозрачность, бесцветность (или заданная цветность), механическая и электрическая прочность, термостойкость, химическая стойкость и газонепроницаемость, минимальное газовыделение при рабочих температурах, рациональность форм и размеров, технологичность в изготовлении и при огневой обработке, возможно низкая стоимость и др. В зависимости от особенностей ламп, для которых предназначена колба, одни из этих требований приобретают большее, другие — меньшее значение.

Большое разнообразие ламп накаливания требует соответствующего ассортимента колб, который можно классифицировать по ряду признаков: 1) по размерам (аналогично приведенной в § 5.2 конструкторско-технологической классификации ламп); 2) по форме (симметричные, асимметричные, каплеобразные, шаровые, цилиндрические и др. — рис. 9.2); 3) по способу обработки поверхности (прозрачные, матированные, молочные, окрашенные, рифленые и др.); 4) по наличию горла (с горлом, без горла — для миниатюрных ламп); 5) по способу изготовления (из жидкого стекла — выдувные и прессованные, машинной или ручной выработки, из дрота); 6) по применяемому для колб материалу (разные марки стекла, кварц).

Разработка колб заключается в выборе материалов, расчете размеров, определении формы. При этом исходят из назначения, заданных параметров, предполагаемых конструкции и технологии ламп, в которых колба будет использоваться.

Основным требованиям в части материалов для колб ламп накаливания удовлетворяют марки стекол, приведенные в табл. 2.1. На основе их можно создать колбы с разными свойствами: бесцветные для большинства ламп общего назначения, а также для прожекторных ламп (СЛ 96-1), выделяющие красную область спектра (СЛ 95-1), термостойкие и ударопрочные (СЛ 40-1, СЛ 52-1), обеспечивающие согласованные спаи с вольфрамом (СЛ 40-1), молибденом (СЛ 52-1), платинитом (СЛ 95-1, СЛ 96-12, СЛ 96-13, СЛ 97-1) и др.

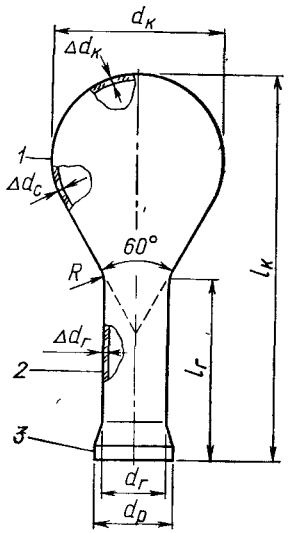


Рис. 9.1. Названия частей и обозначения основных размеров колбы:
1 — основная часть колбы; 2 — горло колбы; 3 — рант

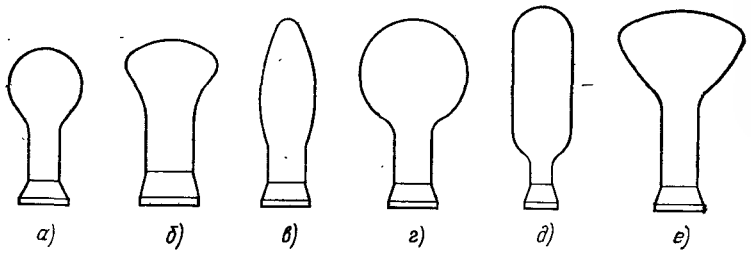


Рис. 9.2. Наиболее распространенные формы колб:
а — каплеобразная; б — грибообразная; в — свечеобразная; г — шаровая; д — цилиндрическая; е — параболическая

Ошибки в выборе размеров, формы и материала колб могут привести либо к удорожанию лампы (когда, например, диаметр колбы необоснованно завышен или форма колбы излишне усложнена), либо к нарушению физических процессов в лампе и ухудшению параметров (колба необоснованно мала и недопустимо перегревается или выбран

неподходящий материал для нее), к снижению эффективности осветительных приборов и установок (когда не учтен тепловой режим приборов, их светотехнические особенности).

9.2. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ КОЛБЫ

Расчет диаметра колбы. Большинство ламп накаливания, в том числе все лампы общего назначения, имеют колбу в той или иной мере близкую к шару (сфере). Определение диаметра такой колбы $d_к$ можно осуществить, исходя из уравнения теплового баланса колбы газоразрядных источников света [5]

$$a_к P = qS, \qquad (9.1)$$

где P — мощность лампы; $a_к$ — доля мощности, идущая на нагрев колбы; S — площадь поверхности колбы; q — средние тепловые потери с единицы внешней поверхности колбы.

Лампы накаливания имеют ряд специфических особенностей, отличающих их от газоразрядных ламп: своеобразную форму тела накала, относительно более низкие тепловые нагрузки на колбу, значительно меньшую толщину и бо́льшую прозрачность стенок колб и др. С учетом этого выражение (9.1) можно записать в виде

$$a'_к \xi'_к \Phi_e + a''_к \xi''_к P_г + \xi'''_к P_ц = qS, \qquad (9.2)$$

где Φ_e — поток излучения тела накала; $\xi'_к$ — доля потока излучения, падающая на колбу; $a'_к$ — коэффициент поглощения излучения стеклом колбы; $P_г$ — мощность, отводимая от тела накала через газ; $\xi''_к$ — доля $P_г$, попадающая на колбу; $a''_к$ — коэффициент, характеризующий часть $P_г$, попадающую на колбу и поглощаемую стеклом колбы; $P_ц$ — мощность, идущая на нагрев цоколя излучением и газом; $\xi'''_к$ — доля $P_ц$, передаваемая цоколем колбе.

Если в (9.2) площадь поверхности колбы S выразить через ее диаметр $d_к$, а вместо q подставить известное выражение для средних тепловых потерь с единицы поверхности колбы

$$q = A d_к^{-0,25} (\overline{T} - T_0)^{1,25} + \varepsilon_к \sigma_0 (\overline{T}^4 - T_0^4), \qquad (9.3)$$

то получим:

$$d_к = \sqrt{\frac{a'_к \xi'_к \Phi_e + a''_к \xi''_к P_г + \xi'''_к P_ц}{\pi \left[A d_к^{-0,25} (\overline{T} - T_0)^{1,25} + \varepsilon_к \sigma_0 (\overline{T}^4 - T_0^4)\right]}}, \qquad (9.4)$$

где A — коэффициент, зависящий от рода окружающего лампу газа, его давления и слабо зависящий от темпера-

туры (для спокойного воздуха при атмосферном давлении и 20 °С значение $A \approx 4{,}3 \cdot 10^{-4}$); $d_к$ — диаметр колбы, мм; $\bar{T}$ и T_0 — средняя температура колбы и температура окружающей колбу среды, К; $\varepsilon_к$ — интегральный коэффициент излучения стекла колбы при температуре T; σ_0 — постоянная Стефана—Больцмана.

Расчет коэффициентов, входящих в (9.4), довольно сложен. Поэтому целесообразно сделать некоторые упрощения. Например, для всех вакуумных ламп, а также для газополных ламп с небольшими потерями в газе (примерно 3—4 %), величиной $P_г$ можно пренебречь. Если так же поступить с заведомо небольшой величиной $P_ц$, характеризующей нагрев колбы от цоколя, то (9.4) приобретает вид, удобный для расчетов:

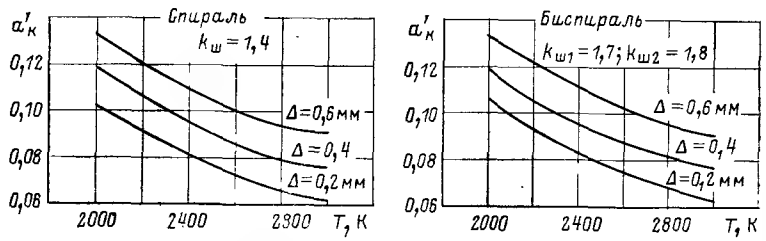


Рис. 9.3. Зависимость коэффициента поглощения излучения стеклом колбы $a'_к$ от температуры тела накала T и толщины образца стекла СЛ 96-1 Δ

$$d_к \approx \sqrt{\frac{a'_к \xi'_к \Phi_e}{\pi q}} =$$

$$= \sqrt{\frac{a'_к \xi'_к \Phi_e}{\pi \left[A d_к^{-0{,}25} (\bar{T} - T_0)^{1{,}25} + \varepsilon_к \sigma_0 (\bar{T}^4 - T_0^4)\right]}}. \qquad (9.5)$$

Для определения $a'_к$ в (9.5) используем выражение

$$a'_к = 1 - \Phi_{e\,пр}/\Phi_{e\,п}, \qquad (9.6)$$

где $\Phi_{e\,п}$ и $\Phi_{e\,пр}$ — падающий на колбу и проходящий через нее потоки излучения.

На рис. 9.3 приведены рассчитанные по (9.6) зависимости $a'_к$ от температуры спирального и биспирального тел накала для различной толщины стенок колб, изготовленных из стекла СЛ 96-1.

Коэффициент $\xi'_к$ определяется из соотношения

$$\xi'_к \approx \Phi_2/\Phi_1, \qquad (9.7)$$

где Φ_1 и Φ_2 — световые потоки лампы без цоколя и с цоколем, определяемые экспериментально.

Поток излучения Φ_e определяется по (7.35). Средняя температура колбы $\bar{T}$ задается, исходя из экспериментально установленных возможных тепловых нагрузок на колбу. Коэффициент $\varepsilon_к$ берется из таблиц для выбранной температуры колбы $\bar{T}$.

Уравнение (9.5) содержит $d_к$ в обеих частях равенства, поэтому определение диаметра колбы по нему осуществляется графически (рис. 9.4). В координатах $d_к$ и y строят две кривые: $y = d^2_к$ и $y = a'_к \xi'_к \Phi_e / \pi q$, полученные для разных значений $d_к$. Точке пересечения этих кривых соответствует на оси абсцисс искомое значение диаметра колбы $d_к$.

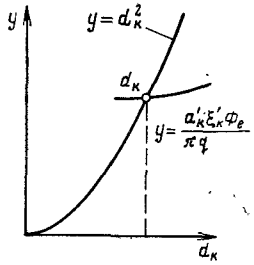


Рис. 9.4. Графическое определение диаметра колбы по уравнению (9.5)

Полученное значение $d_к$ далее необходимо уточнить с учетом следующих соображений. Определение диаметра колбы проводилось, исходя из средней температуры колбы $\bar{T}$. Однако температура в разных точках колбы, особенно у газополных ламп, далеко не одинакова (§ 9.3) и может в отдельных точках недопустимо превзойти выбранную среднюю температуру $\bar{T}$. Если учитывать это, то $d_к$ придется несколько увеличить по сравнению с рассчитанным значением. Размер этой поправки можно установить экспериментально или используя имеющиеся зависимости между $d_к$ и температурой в отдельных точках колбы. Нужно учитывать также, что колбы ламп часто не являются шаром. Поэтому условная сфера, по которой ведется расчет диаметра реальной колбы по (9.5), должна лежать в пределах габаритов этой реальной колбы. В этом случае в результате расчета будет найден наименьший диаметр колбы.

Размеры горла и стенок. Форма колбы. Длина горла колбы $l_г$ прежде всего определяется допустимой температурой в области цоколя. Чем короче горло, тем ближе тело накала к цоколю и тем выше температура на нем. При выборе $l_г$ необходимо учитывать, что предельная допустимая температура нагрева наиболее широко употребляемой идитоловой мастики, скрепляющей цоколь с колбой, равна примерно 90 °С. Существуют и более термостойкие мастики, но они не всегда достаточно технологичны и применяются преимущественно в специальных лампах. Такой же недостаток имеет применяемое в отдельных случаях безмастичное крепление цоколя к колбе. Применение термо-

стойких мастик и безмастичного крепления цоколя позволяет несколько уменьшить длину горла колбы.

Длина горла зависит от особенностей технологического оборудования и технологии заварки ламп. При заварке ножки в колбу с очень коротким горлом основная часть колбы может повредиться огнем газовых горелок.

Диаметр горла колбы $d_г$ должен быть таким, чтобы можно было свободно (вручную или автоматически) вводить через него в лампу смонтированную ножку. Он должен быть также согласован с размером тарелки, чтобы обеспечить качественную спайку тарелки с колбой, и с размером цоколя, чтобы хорошо зацоколевать лампу.

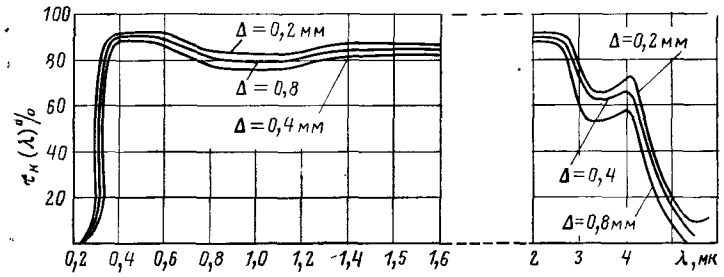


Рис. 9.5. Спектральное пропускание сферических, вырезанных из колбы образцов стекла СЛ 96-1 разной толщины Δ

Толщины купола $\Delta d_к$ и стенки $\Delta d_с$ колбы определяют, исходя из необходимости обеспечения механической прочности колб и достаточной их прозрачности. Вопросы механической прочности колб будут рассмотрены ниже. О прозрачности стекол колб можно судить по рис. 9.5, где показана зависимость коэффициента спектрального пропускания $\tau_к(\lambda)$ сферических (вырезанных из колб) образцов стекла СЛ 96-1 разной толщины (Δ). Несмотря на то что эта зависимость выражена относительно слабо, ее нужно учитывать, особенно в лампах с малым световым потоком.

Важное значение имеет правильный выбор толщины стекла в горле колбы $\Delta d_г$. Если стенка очень тонкая, то она прорвется (проплавится) при заварке лампы, т. е. при сплавлении тарелки ножки с колбой, или будет механически непрочной после заварки; если она толстая, то слабо прогреется, плохо сварится с тарелкой, при этом место заварки может растрескаться. Кроме того, при толстостенном горле снижается производительность труда на операции заварки. Толщина стенок горла может быть определена на основе технологических проб, исходя из требований получения достаточной прочности стекла в зоне цоколя (определяемой проверкой надежности крепления его к колбе), а также достижения высокой производительности и наименьших потерь при огневой обработке. В большинстве колб для ламп накаливания общего назначения, изготавливаемых из жидкого стекла на колбовыдувных автоматах, толщина стенки горла принимается равной 0,8 мм. Для колб автомобильных и других аналогичных ламп, изготавливаемых на автоматах из дротового (трубочного) стекла, толщина стенки горла равна толщине стенки соответствующего дрота.

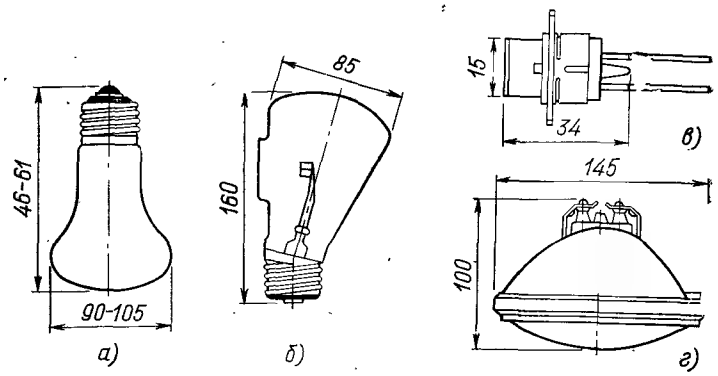


Рис. 9.6. Некоторые специальные формы колб:
грибообразная для криптоновых ламп (*а*); с встроенными окнами (*б*, *в*); прессованные колбы (*г*)

В колбах должно быть ограничено неравенство толщины стенок. Производственные эксперименты показывают, что для ламп накаливания общего назначения разность по толщине в области горла колбы не должна превышать 0,3 мм.

При определении формы колбы исходят из назначения лампы, ее параметров, размера тела накала и некоторых других факторов. Например, из-за низкой теплопроводности криптона колбе криптоновых ламп придают малые размеры и грибообразную форму, что позволяет экономить дорогостоящий газ, удобно размещать в колбе тело накала (рис. 9.6,*а*). Некоторые светоизмерительные лампы имеют встроенные в колбы стеклянные, кремниевые, сапфировые и другие плоские окна (рис. 9.6,*б*, *в*). Специфическую форму приходится придавать колбам ламп-фар, представляю-

щим собой сварную конструкцию из прессованных стеклянных отражателя и рассеивателя (рис. 9.6,*г*). При выборе формы колбы необходимо оценивать возможную температуру на их поверхности при работе лампы, так как распределение температуры по колбе существенно зависит от ее формы (§ 9.3).

Размеры и форма колб для ламп накаливания нормализованы и указаны в технической документации (например, ОСТ 16.0.535.015-80. Колбы для электрических ламп накаливания. Типы, размеры, технические требования). При разработке лампы во многих случаях можно использовать уже имеющиеся колбы, а если таких нет, то конструктор должен определить материал, размеры и форму колбы.

Прочность колб. Под прочностью колб понимают их способность сопротивляться разрушению под действием напряжений в стекле, вызываемых различными причинами. Она зависит от размеров, формы, состояния поверхности, режима термической обработки колб, а также, в меньшей степени, от химического состава стекла.

Колбы ламп накаливания, как правило, обладают довольно большим резервом прочности, однако из-за невозможности обеспечить высокую равномерность размеров стенок они существенно отличаются по этому параметру. Например, лампа накаливания общего назначения в колбе диаметром 65 мм разрушается при внутреннем давлении от 0,3 до 1,2 МПа. Во избежание разрушения этих ламп в производстве и при эксплуатации ориентируются на нижнюю границу прочности, т. е. на давление внутри лампы меньше 0,3 МПа (если не учитывать других ограничений на давление в лампе, не связанных с прочностью колб — см. § 6.3).

Прочность колб на воздействие внутреннего и внешнего давления увеличивается с уменьшением ее поверхности и увеличением толщины стенок. Стенкам колб стремятся придать такую оптимальную толщину, при которой они получаются достаточно прочными и вместе с тем не вызывают излишнего расхода стекломассы, не ухудшают каких-либо параметров ламп, не усложняют технологию их изготовления. Для мощных ламп, содержащих бо́льшую массу газа, применяют более толстостенную колбу. Повышение давления газа в лампе уменьшает скорость распыления вольфрама и одновременно увеличивает возможность разрушения колбы. Поэтому выбор давления наполняющего газа и размеров колб нужно осуществлять согласованно, увязывая различные факторы.

Прочность колб можно проверить как экспериментально (наполняя лампу до давления, разрушающего колбу, и фиксируя это давление), так и расчетным путем (пользуясь методами теории сопротивления материалов). При расчете следует учитывать, что прочность всей колбы определяется прочностью ее основной части, а не горла, которое всегда имеет бо́льшие толщину стенок и прочность. Поэтому расчет прочности колб проводится только для ее основной части. Необходимо иметь в виду также следующее: расчетно и экспериментально установлено, что если σ_z — предел прочности отожженного стекла, а $k_з$ — коэффициент запаса прочности, то допустимое максимальное напряжение этого стекла $\sigma_{доп}=\sigma_z/k_з\approx 6{,}86\cdot 10^6$ Па; прочность стекла при сжатии в 10—12 раз больше, чем при растяжении; прочность поверхностных слоев стекла меньше, чем внутренних; колбы ламп лучше противостоят внешнему давлению, чем внутреннему.

Колба в работающей лампе испытывает два вида напряжений, во-первых, под действием внутреннего избыточного давления (разрывные напряжения), во-вторых, вследствие различия температуры и теплового расширения разных участков стенки колбы (термические напряжения). Эти напряжения характеризуются радиальными (нормальными) и тангенциальными (касательными) составляющими.

Для *сферической* колбы разрывные напряжения описываются следующими уравнениями, справедливыми как для толстостенных оболочек, так и тонкостенных (у которых толщина стенки намного меньше радиуса), находящихся под внутренним давлением[1]:

$$\sigma_{P_r}=p\frac{r^3_{вт}}{r^3_{вш}-r^3_{вт}}\left(1-r^3_{вш}/r^3\right), \qquad (9.8)$$

$$\sigma_{P_\theta}=p\frac{r^3_{вт}}{2\left(r^3_{вш}-r^3_{вт}\right)}\left(2+r^3_{вш}/r^3\right), \qquad (9.9)$$

а термические напряжения могут быть определены из соотношений [5]

$$\sigma_{T_r}=P_qC\left[r_{вт}-\frac{r^2_{вт}}{r^2}+\frac{(r_{вш}-r_{вт})r^4r^2_{вш}}{r^3_{вш}-r^3_{вт}}\left(\frac{1}{r^3}-\frac{1}{r^3_{вт}}\right)\right], \qquad (9.10)$$

$$\sigma_{T_\theta}=P_qC\left[r_{вт}-\frac{r^2_{вт}}{2r}-\frac{(r_{вш}-r_{вт})r^4r^2_{вш}}{r^3_{вш}-r^3_{вт}}\left(\frac{1}{2r^3}+\frac{1}{r^3_{вт}}\right)\right], \qquad (9.11)$$

где σ_{P_r} и σ_{P_θ} — радиальная и тангенциальная составляющие разрывных напряжений, Па; σ_{T_r} и σ_{T_θ} — радиальная и тангенциальная составляющие термических напряжений, Па; p — избыточное давление внутри работающей лампы, Па; $r_{вш}$ и $r_{вт}$ — радиусы внешней и внутренней поверхности колбы, м; r — радиус поверхности колбы, в точках которой определяется напряжение, м; P_q — поверхностная плотность тепло-

[1] **Беляев Н. М.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976. 608 с. (см. § 145).

вого потока через внутреннюю стенку колбы, Вт/м²; C — коэффициент, определяемый параметрами стекла, Н/(м·Вт).

Величины P_q и C определяются соотношениями

$$P_q = Pa_к/S_{вт} \text{ и } C = \alpha E/[\lambda_c(1-\mu)], \qquad (9.12)$$

где P — мощность лампы, Вт; $a_к$ — доля мощности лампы, идущая на нагрев колбы; ($a_к \approx 0{,}06$, как следует из баланса энергии газополной лампы [8]; $S_{вт}$ — площадь внутренней поверхности основной части колбы, м²; α — температурный коэффициент линейного расширения стекла, К⁻¹; E — модуль Юнга, Па; λ_c — теплопроводность стекла, Вт/(м·К); μ — коэффициент Пуассона.

Из (9.8)—(9.11) видно, что разрывные напряжения зависят от давления в лампе и размеров колбы, а термические — от мощности лампы, свойств материала колбы и ее размеров.

Суммарное значение напряжений, действующих на внешней поверхности колбы

$$\sigma_{r вш} = \sigma_{P_r вш} + \sigma_{T_r вш}; \quad \sigma_{\theta вш} = \sigma_{P_\theta вш} + \sigma_{T_\theta вш}; \qquad (9.13)$$

а на внутренней поверхности

$$\sigma_{r вт} = \sigma_{P_r вт} + \sigma_{T_r вт}; \quad \sigma_{\theta вт} = \sigma_{P_\theta вт} + \sigma_{T_\theta вт}. \qquad (9.14)$$

Наибольшее из значений $\sigma_{вш}$ и $\sigma_{вт}$ будет характеризовать значение напряжений, возникающих на колбе лампы.

Если допустимое напряжение на колбе задается заранее (т. е. σ_{P_r}, σ_{P_θ} и размеры колбы известны), то по (9.8) или (9.9) можно найти избыточное давление в работающей лампе p, а затем по соотношению $p = p_0[1+\beta(T-T_0)]$ давление p_0, до которого можно наполнить лампу при ее изготовлении (T и T_0 — температуры наполняющего газа в рабочем и нерабочем состоянии лампы, К; $\beta \approx 0{,}00367$).

Расчеты показывают, что радиальные составляющие разрывных и термических напряжений у сферических колб малы и ими можно в ряде случаев пренебречь. Главную роль играют растягивающие усилия, обусловленные тангенциальными составляющими напряжений. Разрушение стеклянной колбы наступает тогда, когда эти усилия достигнут реального предела прочности колбы.

Для расчета прочности колб *цилиндрической* формы можно воспользоваться соотношениями, приведенными в [5], а также в указанной выше литературе по сопротивлению материалов.

9.3. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ КОЛБ

Под тепловым режимом колбы понимается распределение температуры по ее поверхности в стационарных рабочих условиях. Средняя и локальные (в отдельных точках)

температуры колбы зависят от многих факторов и заметно влияют на параметры лампы. Поэтому знание этих связей и их использование при разработке ламп является необходимым условием создания источников света высокого качества.

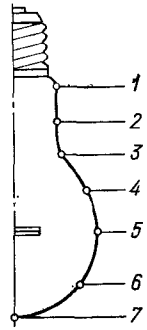


Рис. 9.7. Характерные точки на колбе, в которых обычно измеряется температура

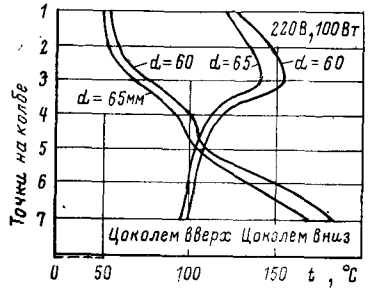


Рис. 9.8. Зависимость температуры колбы от ее диаметра и положения лампы в пространстве

Зависимость температуры колб от различных факторов. На рис. 9.7 показаны характерные точки на колбе, в которых обычно измеряется температура при исследовании теплового режима колб. Качественное, а для ряда случаев и количественное представление о влиянии различных факторов на тепловой режим колб можно получить из

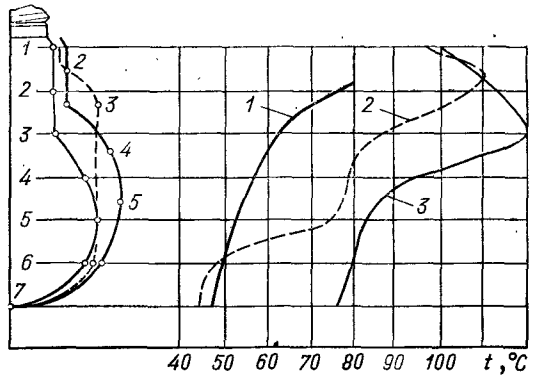
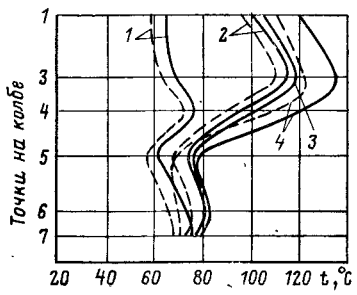


Рис. 9.9. Влияние формы колбы на распределение температуры по ее поверхности:

1 — шаровой; *2* — цилиндрической; *3* — шар-конус (у всех ламп одно и то же тело накала, предназначенное для лампы Б215-225-100)

рис. 9.8—9.12. На этих рисунках (кроме рис. 9.11) на оси ординат отмечены точки измерения температуры, а на оси абсцисс — значения локальных температур на поверхности колбы. Из рис. 9.8 видно, что с уменьшением диаметра (и



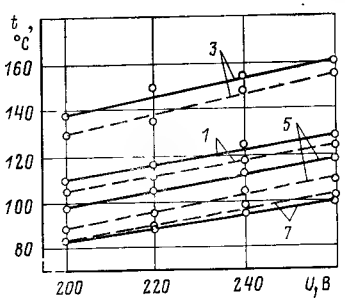


Рис. 9.10. Распределение температуры по колбе ламп, изготовленных с телом накала от лампы Б215-225-100:

1 — вакуум; *2* — технический аргон — 86% Ar+14% N_2, 400 гПа (300 мм рт. ст.); *3* — технический аргон, 960 гПа (650 мм рт. ст.); *4* — азот, 960 гПа (650 мм рт. ст.). При измерениях поддерживается неизменным световой поток лампы: Ф=1150 лм (сплошные линии), Ф=650 лм (пунктирные линии)

Рис. 9.11. Зависимость температуры колбы от напряжения на лампе Б215-225-100:

——— — колба ШК-60; — — — — колба ШК-65; *1, 3, 5* и *7* — точки измерения температуры на колбе

объема) колб температура практически равномерно возрастает во всех точках колбы и форма кривых распределения температуры по колбе остается примерно одинаковой.

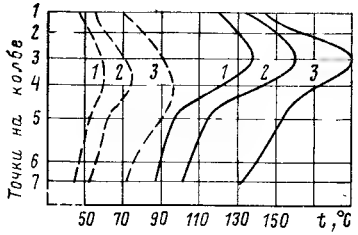


Рис. 9.12. Изменение температуры колбы в процессе горения лампы:

1 — первоначальные значения температур; *2* — через 150 ч; *3* — через 375 ч. Пунктирные линии относятся к вакуумной лампе В215-225-25, а сплошные — к газополной Б215-225-100. Положение ламп с цоколем вверх, напряжение —110% номинального

Изменение положения ламп в пространстве заметно меняет распределение температуры, что указывает на существенную роль конвекции газов в процессе нагрева колб. Рисунок 9.9 косвенно иллюстрирует влияние формы колб на характер распределения конвекционных потоков. Как видно, изменяя форму колбы, можно менять распределение температуры по поверхности. На рис. 9.10 воспроизведены результаты измерения температуры колб вакуумного и

газополного вариантов ламп. Из рисунка видно, что введение газа в лампу и увеличение его давления существенно ухудшают тепловой режим колб, во многом меняют (по сравнению с вакуумным вариантом) характер распределения температуры по колбе. Повышение температуры тела накала сопровождается увеличением температуры колбы. На рис. 9.11 приведено распределение температуры на колбе лампы Б215-225-100 (положение цоколем вверх), включаемой на разное напряжение. Как видно, зависимость локальных температур колбы от напряжения практически линейна.

Изложенное свидетельствует о том, что имеется немало эффективных способов регулирования температурного поля колб ламп накаливания, которые можно использовать при конструировании.

Зная локальные температуры, нетрудно оценить среднюю температуру колбы:

$$\bar{T} = \frac{S_1T_1 + S_2T_2 + \ldots + S_nT_n}{S}, \qquad (9.15)$$

где $S_{1,2\ldots n}$ и $T_{1,2\ldots n}$ — площади и температуры отдельных зон колбы; S — общая площадь поверхности колбы.

Для определения средней температуры колбы $\bar{T}$ имеется аналитическая зависимость, полученная путем несложных преобразований (9.5):

$$\bar{T}^4 = \frac{a'_{\text{к}}\xi'_{\text{к}}\Phi_e - \pi d_{\text{к}}^{1,75} A\,(\bar{T} - T_0)^{1,25} + \pi d^2_{\text{к}}\varepsilon_{\text{к}}\sigma_0 T^4_0}{\pi d^2_{\text{к}}\varepsilon_{\text{к}}\sigma_0}. \qquad (9.16)$$

Решение (9.16) относительно $\bar{T}$ проводится графически аналогично тому, как решалось (9.5).

Температура колбы может заметно повышаться в процессе горения лампы (рис. 9.12).

Влияние температуры колбы на параметры ламп. Одним из нежелательных последствий перегрева стекла является усиленное газовыделение из него, загрязняющее окружающую тело накала среду и усиливающее распыление вольфрама.

Необходимо учитывать, что интенсивность газовыделения стекла неодинакова при разных температурах. Это видно из типовой кривой газоотдачи стекла (рис. 9.13,*а*): стекло имеет начальный максимум газовыделения (соответствующий температуре прогрева стекла при сборке ламп — менее 200 °С) и вторичный максимум газовыделения (наступающий при 300—450 °С), после прохождения

которого стекло начинает непрерывно выделять газы. Между этими максимумами расположена область «спокойного» состояния стекла, соответствующая 200—300 °С, при которых стекло имеет минимальное газовыделение. Это подтверждается кривыми, приведенными на рис. 9.13,*б*, где показана газоотдача стекол разных составов. В связи с этим, выбирая размеры и форму колбы, определяя расположение стеклянных деталей лампы относительно тела накала и решая другие вопросы конструирования ламп,

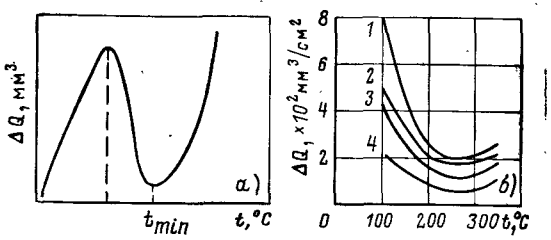


Рис. 9.13. Изменение количества выделяющихся из стекла газов ΔQ при нагреве стекла:

а — типичная кривая газоотдачи стекла; *б* — газоотдача стекол СЛ 96-1 (1), СЛ 96-12 (2), С 87-1 (3), С 88-8 (4)

необходимо исходить из того, чтобы стеклянные детали в работающей лампе находились при температуре менее 300 °С. Не следует добиваться и слишком низкой температуры деталей из стекла (существенно меньших 200 °С), так как это неизбежно приведет к увеличению размеров ламп и их удорожанию.

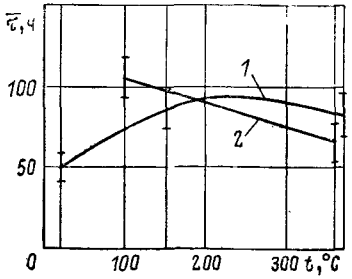


Рис. 9.14. Примерная зависимость срока службы экспериментальных низковольтных маломощных ламп от температуры колбы:

1 — аргоновые лампы накаливания; *2* — вакуумные лампы накаливания

Повышение температуры колбы может иметь в определенных условиях положительное значение. На рис. 9.14 приведена экспериментальная зависимость срока службы ламп от температуры колбы, полученная для маломощных низковольтных ламп. Как видно, повышение температуры колб газополных ламп до некоторого значения (очевидно, до наступления стабильного газовыделения из стекла) приводит к повышению срока

службы. Когда газовыделение становится значительным, то срок службы начинает уменьшаться. Указанный эффект вызван, по-видимому, повышением концентрации атомов инертного газа вблизи тела накала с ростом температуры колбы лампы. В вакуумных лампах этого произойти не может, поэтому повышение температуры колбы сопровождается снижением срока службы ламп.

9.4. ЦОКОЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Цоколь — это часть электрической лампы, предназначенная для ее установки в патрон и обеспечения контакта с электрической сетью.

Можно выделить четыре основные части цоколя (рис. 9.15): 1) металлический *корпус*, который служит для установки лампы в патроне, обеспечения электрических контактов между сетью (гильзой патрона) и электродом лампы (в большинстве цоколей он приваривается к кор-

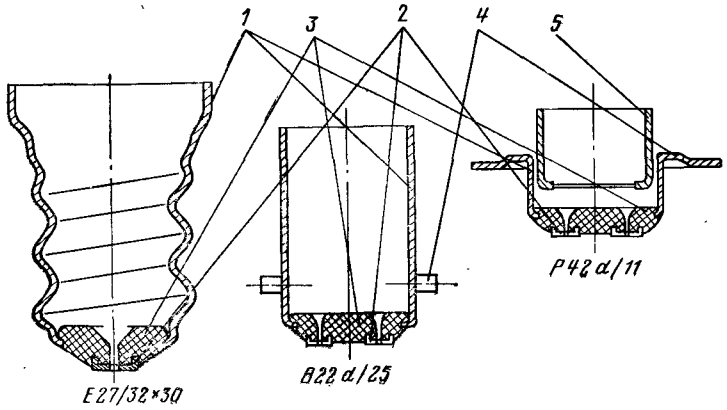


Рис. 9.15. Устройство цоколя:

1 — корпус; *2* — контактные пластины; *3* — изолятор; *4* — фокусирующие детали; *5* — стакан

пусу), нанесения маркировки на рант, соединения цоколя с горлом лампы; 2) металлические *контактные пластины*, служащие для осуществления электрического контакта между сетью (контактами патрона) и другими электродами лампы, которые припаиваются или привариваются к пластинам; 3) стеклянный или керамический *изолятор*, обеспечивающий механическое соединение корпуса с контактными пластинами и электрически изолирующий их друг от друга; 4) *фокусирующие детали*, которые позволяют уменьшить поле допуска по высоте светового центра и точно совмещать световой центр с фокусом оптической системы.

Существует большое разнообразие исполнений цоколей, и весьма желательно при конструировании новых ламп не создавать без достаточных оснований новых разновидностей, а использовать существующие. Все цоколи разделяются на следующие основные группы: 1) резьбовые цоколи (обозначаются буквой Е — рис. 9.16); 2) штифтовые (В — рис. 9.17); 3) штифтовые для автомобильных ламп (ВА); 4) фокусирующие (Р — рис. 9.18); 5) штырьковые (G); 6) цилиндрические (S); 7) цилиндрические с коническим концом (SV). Цоколи групп 5—7 встречаются довольно редко.

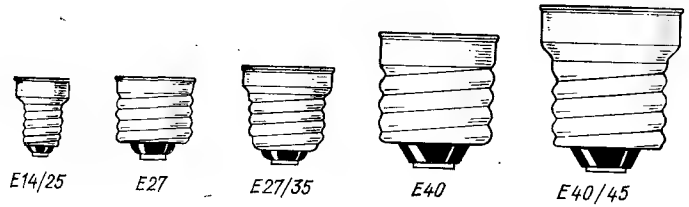


Рис. 9.16. Резьбовые цоколи

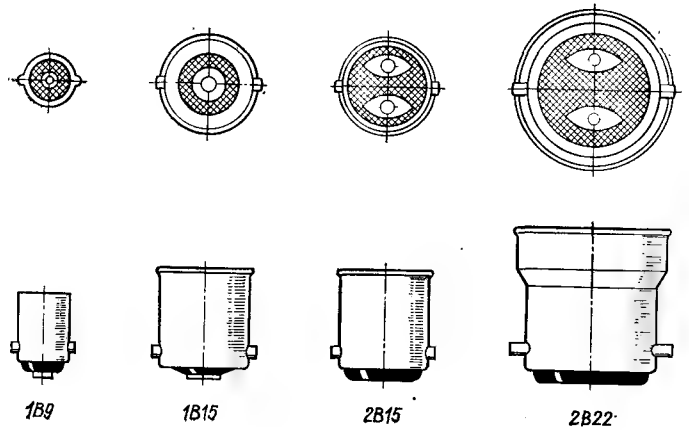


Рис. 9.17. Штифтовые цоколи

Главная особенность резьбовых цоколей — наличие на их металлическом корпусе винтообразной резьбы. Поскольку такой цоколь устанавливается в патрон ввинчиванием, он не может иметь больше одной контактной пластины. В зависимости от размеров лампы применяются резьбовые цоколи с наружным номинальным диаметром резьбы, равным 10, 14, 27 и 40 мм.

Штифтовые цоколи имеют гладкий цилиндрический корпус. Для того чтобы закрепить его в соответствующем патроне, в корпус вставляются (или из тела корпуса выдавливаются) штифты, расположенные по диаметру с противоположных сторон корпуса. При установке в патрон и повороте штифты входят в прорези затвора патрона. Такие

цоколи имеют одну или две контактные пластины; в последнем случае электроды привариваются к обеим контактным пластинам, а корпус не является токоведущей частью. Штифты иногда располагают на разной высоте, тогда цоколь можно разместить в патроне только в определенном положении. Штифтовые цоколи, не считая некоторых специальных, имеют диаметры корпусов 9, 15 и 22 мм. Цоколи со штифтами применяют прежде всего для транспортных, а также некоторых других ламп, эксплуатируемых в условиях вибрации и ударов.

Резьбовые и штифтовые цоколи могут иметь рант разного диаметра и ширины (цилиндрической формы расширение на свободном торце). Цоколи с рантом применяются для ламп, имеющих большой диаметр горла колбы.

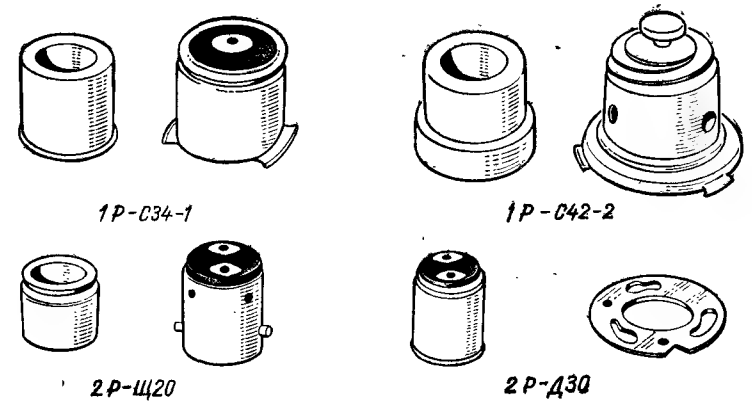


Рис. 9.18. Фокусирующие цоколи

Фокусирующие цоколи состоят из двух раздельных деталей (рис. 9.15). Одна из них (стакан) прикрепляется к колбе лампы, а другая (фокусировочный фланец) припаивается к первой после того, как с помощью специального устройства зафиксировано необходимое положение тела накала относительно фланца. Фланцы, будучи закрепленными на лампе, позволяют точно устанавливать лампу в оптических приборах.

К цоколям предъявляется ряд общих требований. Главное из них заключается в том, чтобы цоколь был полностью сопряжен с патроном. Для обеспечения этого на цоколи и патроны разработаны международные рекомендации и в соответствии с ними — отечественные стандарты. Сопрягаемость цоколей и патронов оценивается специальными стандартизованными проходными (резьбовыми) и непроходными (гладкими) калибрами.

Для всех металлических деталей цоколя должно быть предусмотрено применение нержавеющего металла или соответствующих противокоррозионных покрытий. Для корпусов широко используется оцин-

кованная сталь, а для тяжелых условий эксплуатации — латунь или никелированная латунь, допускается также изготовлять корпуса из алюминия. Контактные пластины практически всегда выполняются из латуни.

Изолятор цоколя должен быть неэлектропроводным, влаго- и теплостойким, механически прочным, он должен механически надежно скрепляться с корпусом цоколя и с контактными пластинами. Размеры изолятора и контактных пластин, расстояния между контактными пластинами, а также между пластинами и корпусом должны быть определены, исходя из электрических нагрузок на цоколь в данной лампе. Стандартом предусматривается, чтобы в двухконтактных штифтовых цоколях электрическое сопротивление изоляции между каждой контактной пластиной и корпусом цоколя, измеренное при постоянном напряжении 500 В, было не менее 50 МОм. В стандарте на цоколи резьбовые и штифтовые приведены значения напряжения, тока и мощности, допустимые в цоколях и патронах, которыми следует руководствоваться при выборе цоколей для разрабатываемых ламп.

Для изготовления изоляторов цоколей чаще всего используется стекло СЛ 96-7, сваренное из боя стекла СЛ 96-1 и СЛ 96-12 с добавкой красителей, улучшающих внешний вид изоляционного слоя, и некоторых компонентов, облегчающих варку. Изоляторы изготовляются также из керамики, когда цоколи предназначаются для мощных ламп.

Важным элементом конструирования ламп накаливания является выбор способа крепления цоколя к лампе. До сих пор не найдено удовлетворительного решения этой задачи, поэтому бывают случаи отделения цоколя во время эксплуатации ламп, сопровождающиеся замыканием выводов и разрушением лампы. Причинами для этого могут быть: неправильный выбор цоколевочной мастики, нарушение технологии ее изготовления, малая дозировка мастики в цоколе, дефекты нанесения мастики на цоколь, несоответствие размеров горла лампы и цоколя, неудачный выбор формы горла лампы или его плохая формовка, нарушение режима цоколевания, перегрев мастики во время эксплуатации ламп и др.

Наиболее часто для крепления цоколя к лампе применяется специальная мастика, состоящая из связующего вещества (искусственной смолы), отвердителя (уротропина), пластифицирующего вещества (канифоли), наполнителя (мраморного порошка), растворителя (этилового спирта), индикатора (малахитовой или бриллиантовой зелени). Мастика наносится на цоколь; цоколь соединяется с горлом лампы так, чтобы мастика обтекала и горло и цоколь; затем осуществляется полимеризация мастики нагревом газовыми горелками.

Для поддержания прочного соединения цоколя с колбой в процессе горения ламп стремятся прежде всего понизить разными приемами температуру в зоне цоколя (увеличение объема колб и высоты светового центра, уменьшение диаметра горла колбы, установление теплоотражательных экранов между телом накала и цоколем, применение компактного тела накала, изменение состава и давления наполняющего газа, использование цоколевочной мастики светлого цвета, регламентация положения лампы во время эксплуатации и др.). При прочих равных условиях температура цоколя снижается при замене азота техническим аргоном на 20—30 °С, при замене слюдяного экрана металлическим — на 15—20, при применении двух металлических экранов вместо одного — на 30—40 °С. Следует учитывать, что температура цоколя повышается при работе лампы в патроне на 10—15 °С, а в световых приборах — еще на несколько градусов. Она увеличивается также при нанесении на колбу диффузных, зеркальных, цветных и других покрытий.

Прочность крепления цоколя улучшается благодаря механической формовке горла лампы при заварке с образованием углублений или выступов. Обтекание их мастикой усиливает связь цоколя с лампой. Поэтому важно выбрать размеры, форму и количество таких образований и обеспечить их осуществление на операции заварки ламп.

Для некоторых типов специальных ламп, имеющих напряженный тепловой режим, разработаны рецепты термостойких мастик. Однако они не находят широкого применения из-за повышенной стоимости и недостаточной технологичности. Цоколевание отдельных видов мощных специальных ламп осуществляется с помощью асбеста. Полоски асбестового картона свертывают в гильзу и приклеивают жидким стеклом к внутренней стенке корпуса с последующим увлажнением. Далее цоколь напрессовывают на горло лампы вручную или винтовым прессом. После испарения влаги асбест обеспечивает прочный контакт цоколя с лампой.

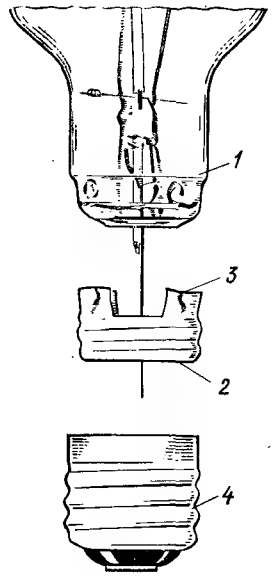


Рис. 9.19. Безматичное крепление цоколя:

1 — углубления на горле лампы; *2* — гильза; *3* — выступы на гильзе; *4* — резьбовой цоколь

В мощных лампах накаливания общего назначения и в зеркальных лампах применяется механическое цоколевание без применения мастики. Для этого используют прием, показанный на рис. 9.19. Во время заварки лампы на ее горле отформовывается цилиндрический поясок с углублениями. Далее изготавливается латунная гильза с резьбой и выступами, расположенными соответственно углублениям на горле. Гильзу надевают на горло лампы, совмещая выступы гильзы с углублениями на горле. На гильзу навинчивают цоколь, который своим рантом плотно прижимает гильзу к горлу лампы. Другим спо-

собом является крепление цоколя к колбе, горло которой формуется в виде резьбы и на которую навинчивается резьбовой цоколь.

Глава десятая

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ГАЛОГЕННЫХ ЛАМП. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

10.1. ГАЛОГЕННЫЕ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ИХ КОНСТРУИРОВАНИЯ

В 1959 г. появились первые сообщения о создании ламп накаливания с добавками йода к наполняющему газу. Это явилось принципиально новым и важным этапом в развитии тепловых электрических источников света. Развитие галогенных ламп накаливания стало самым значительным событием в области тепловых источников света после внедрения биспиральных ламп с криптоновым наполнением. Оно существенно упрочило положение ламп накаливания в осветительных установках. Полностью сохраняя положительные качества традиционных ламп накаливания, они обладают дополнительными преимуществами: более стабильным во время горения световым потоком, относительно бо́льшими световой отдачей и полезным сроком службы [1, 20]. Для повышения технического уровня этих ламп, расширения их номенклатуры и увеличения объемов производства уже много сделано. Однако резервы дальнейшего прогресса еще далеко не исчерпаны.

Принципы работы галогенных ламп. Галогенная лампа — это лампа накаливания, имеющая кварцевую колбу преимущественно трубчатой формы, наполненную инертным газом с добавкой галогенов или их соединений, обеспечивающих обратный перенос испарившихся частиц вольфрама со стенок колбы на тело накала.

В отличие от обычной лампы накаливания, колба галогенной лампы в процессе горения все время остается прозрачной, что обеспечивает стабильность светового потока. Из других достоинств галогенных ламп следует отметить их малые размеры по сравнению с обычными лампами накаливания такой же мощности, относительно высокую термостойкость и механическую прочность кварцевой колбы. Малые размеры и прочная оболочка позволяют наполнять их ксеноном до высоких давлений, получая на этой основе высокие яркости и повышенную световую отдачу (либо повышенный срок службы).

Процесс возвращения с помощью йода испарившихся частиц вольфрама со стенки колбы на тело накала (возвратный или регенеративный цикл) протекает по принципиальной схеме, изображенной на рис. 10.1, и лишь при определенных условиях. При 300—1200 °С пары йода соединяются на стенке колбы с частицами вольфрама, об-

разуя йодистый вольфрам WI_2. Последний переходит в парообразное состояние при температуре свыше 250—300 °С. Диффундируя в зону, находящуюся вблизи тела накала, с температурой 1400—1600 °С, молекулы WI_2 распадаются. Частицы вольфрама оседают на тело накала и другие детали, имеющие температуру свыше 1600 °С. Освободившиеся атомы йода, диффундируя в объеме лампы, соединяются на стенках колбы с вольфрамом, вновь образуя WI_2. Затем цикл снова повторяется.

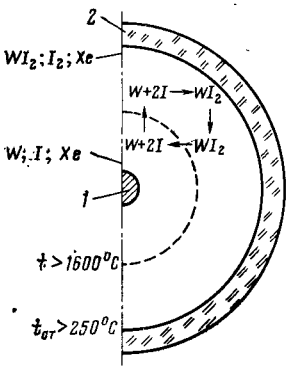


Рис. 10.1. Упрощенная схема действия йодно-вольфрамового возвратного цикла:
1 — тело накала; 2 — стенка колбы

Из указанного ясно, что йодно-вольфрамовый цикл может поддерживаться при следующих условиях: 1) температура внутренней стенки колбы должна быть не ниже 250 и не выше 1200 °С (предпочтительно 500—600 °С); 2) минимальная температура тела накала должна быть выше 1600 °С; 3) йод не должен вступать в лампе в любые другие химические соединения, кроме как с вольфрамом (поэтому в галогенной лампе нельзя применять никель и молибден, алюминиевый, циркониевый и фосфорный газопоглотители); 4) введение в лампу избытка йода для компенсации его потерь не допускается, так как пары йода заметно поглощают видимое излучение, особенно в области 500—520 нм.

Йодно-вольфрамовый цикл препятствует осаждению вольфрама на колбе, но не обеспечивает его возвращения в дефектные участки тела накала. Поэтому механизм перегорания тела накала в йодных лампах остается таким же, как и в обычных лампах накаливания.

Применение йода в галогенных лампах выявило его некоторые недостатки: агрессивность по отношению к металлическим деталям, трудность дозировки, некоторое поглощение видимого излучения. Другие галогены (бром, хлор, фтор), будучи более агрессивными, не смогли его заменить. В настоящее время в подавляющем большинстве галогенных ламп применяют химические соединения галогенов: CH_2Br_2 (бромистый метил) и CH_3Br (бромистый метилен). Это жидкости со сравнительно высокой упругостью паров. Сами жидкости и их пары химически не очень активны; они удобны для введения в лампу как отдельно, так и в смеси с инертным газом; их удобно дозировать; чистый бром выделяется в зонах с температурой свыше 1500°С. Для ламп с большим сроком службы применяют CH_3Br, полагая, что таким путем вводится некоторый избыток водорода, компенсирующий его утечку через горячую кварцевую колбу. Продолжается работа над подбором новых летучих химических соединений галогенов.

Исследования показывают, что механизм возвратного цикла значительно сложнее, чем представлялось на ранней стадии разработки галогенных ламп. Например, установлено, что йодно-вольфрамовый цикл не происходит в лампе, абсолютно свободной от кислорода. Однако введение в галогенную лампу кислорода, как и в обычных лампах, способствует появлению известного, весьма вредного для лампы, «водяного цикла».

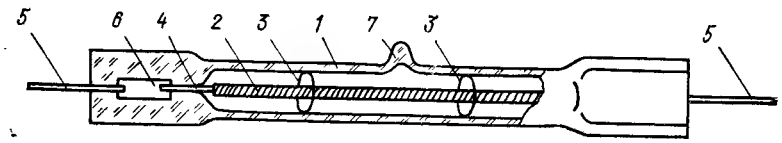


Рис. 10.2. Трубчатая лампа накаливания с йодно-вольфрамовым циклом:

1 — кварцевая колба; *2* — тело накала; *3* — держатели; *4* — ввод; *5* — выводы; *6* — вакуумно-плотный впай; *7* — место отпайки штенгеля

Галогенные лампы имеют не только достоинства, но и недостатки. Например, их невозможно долго эксплуатировать в наклонном или вертикальном положении, так как при этом галогенные добавки и инертный газ в основном из-за разности молекулярных масс разделяются друг от друга и регенеративный цикл прекращается. Этот недостаток относится преимущественно к длинным лампам. Удалось установить, что его можно преодолеть путем выбора соответствующего давления наполняющего газа, причем область низких давлений неприемлема, так как при этом сокращается срок службы ламп. Другой недостаток заключается в том, что из-за высокой стоимости кварца и недостаточной технологичности галогенных ламп (по сравнению, например, с лампами накаливания общего назначения) они пока еще дороги.

Особенности конструирования галогенных ламп. Для выполнения условий протекания йодно-вольфрамового цикла в галогенных лампах пришлось применить новые конструктивные решения, отличные от тех, которые использовались в обычных лампах накаливания. Первые галогенные лампы с йодом имели вид, представленный на рис. 10.2. Колба лампы — длинная кварцевая трубка; тело накала — прямолинейная вольфрамовая спираль, закрепленная по оси колбы на вольфрамовых кольцеобразных держателях; вольфрамовые вводы, расположенные по обоим концам трубки, соединяются с выводами молибденовой фольгой, впаянной в кварц; на боковой стенке колбы имеется место отпая штенгеля. Диаметр трубки и располо-

жение тела накала относительно нее определяются необходимостью получения на внутренней стенке трубки при горении лампы 500—600 °С (но не менее 250 и не более 1200 °С).

Лучшим материалом для колбы-трубки является кварцевое стекло (см. § 2.2). Возможно также применение специального тугоплавкого стекла с содержанием 96—98 % окиси кремния (кварцеидное стекло).

Вакуумно-плотные впаи в кварцевое стекло выполняются в следующих исполнениях: 1) фольговые впаи; 2) впаи на переходных стеклах. Традиционные для ламп накаливания впаи согласованного типа в данном случае применить невозможно, так как ни один металл при температуре раз-

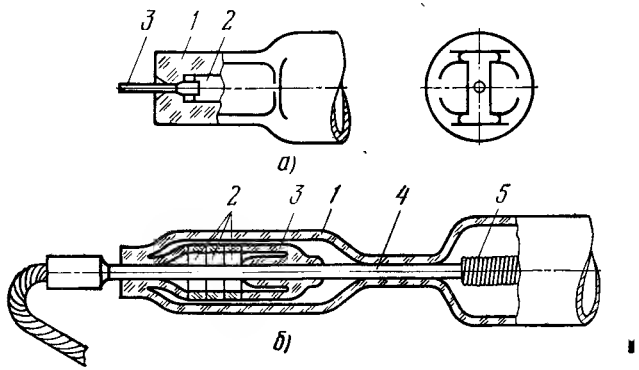


Рис. 10.3. Основные типы вакуумно-плотных впаев в кварцевое стекло:

а — плоский фольговый впай (*1* — кварцевое стекло; *2* — молибденовая фольга; *3* — молибденовый вывод); *б* — впай на переходных стеклах (*1* — кварцевое стекло; *2* — переходные стекла; *3* — «вольфрамовое» стекло; *4* — вольфрамовый электрод; *5* — тело накала)

мягчения кварцевого стекла не имеет такого малого температурного коэффициента расширения, как кварцевое стекло.

Плоский фольговый впай (рис. 10.3,*а*) — это полоска из молибденовой фольги, заваренная в кварцевое стекло. К концам фольги точечной сваркой привариваются вольфрамовая (ввод) и молибденовая (вывод) проволоки; ввод, вывод и впай вместе являются электродом лампы. Фольговый впай имеет ширину 1—6 мм и длину 8—50 мм.

Фольговый впай — это типичный несогласованный впай, в котором герметичность обеспечивается благодаря малой

толщине фольги, составляющей 25—30 мкм. Размеры фольгового впая выбираются, исходя из теплового режима спая, обусловленного параметрами лампы, а также из конструктивно-технологических соображений.

Существенную трудность вызывает постоянное окисление молибденовой фольги в месте сварки с выводом при температурах, превышающих 300—350 °С. В результате может произойти растрескивание кварцевого стекла или разрушение контакта впая с выводом. Это обстоятельство необходимо учитывать при конструировании и эксплуатации ламп. Впаи с одиночной плоской фольгой нормально работают при токе до 8—10 А. Окисление выводов и впая можно предотвратить, помещая галогенную лампу во внешнюю стеклянную колбу, наполненную инертным газом, однако такое решение существенно удорожает лампу и ограничивает области применения.

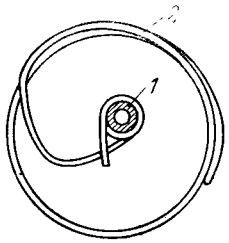


Рис. 10.4. Держатель тела накала в галогенной лампе накаливания:
1 — тело накала; 2 — держатель

При конструировании галогенных ламп на токи больше 10 А применяют впаи, состоящие либо из нескольких тонких полосок фольги, соединенных параллельно, либо из цилиндрических фольговых впаев. Широко используются также впаи на переходных стеклах (рис. 10.3,*б*). Недостаток этих впаев заключается в том, что их изготовление требует высокой квалификации, трудоемко и не поддается механизации.

Тело накала изготавливается из специальных марок вольфрамовой проволоки, преимущественно в виде спирали, которой в лампе с помощью электродов и держателей придается необходимая форма. Расчет тела накала галогенных ламп производится, в принципе, теми же методами, что и обычных ламп накаливания (см. гл. 7).

В трубчатых галогенных лампах относительно большой длины тело накала представляет собой прямолинейную спираль. Она располагается по оси колбы и поддерживается в заданном положении специальными кольцеобразными держателями из вольфрамовой проволоки (рис. 10.4). Один конец держателя на специальном приспособлении навивается на тело накала, а кольцо держателя опирается на внутреннюю поверхность трубки. Диаметр проволоки держателя и расстояние между держателями определяются с учетом длины и массы тела накала из расчета, чтобы участки спирали между держателями не провисали; диаметр кольца держателя выбирается близким внутреннему диаметру трубки.

Галогенные лампы, обладая относительно малыми размерами (объемами) и прочными кварцевыми оболочками, позволяют применять в них дорогостоящий газ — ксенон и повысить его давление в лампе до нескольких сотен килопаскалей. Благодаря этому удается существенно увеличить температуру тела накала, а вместе с этим яркость и световую отдачу. При этом галогенный цикл обеспечивает стабильность светового потока. Выбор состава и давления наполняющего газа должен осуществляться с учетом объема лампы, прочности колбы, тепловых потерь в газе, стоимости газов и др.

Основные типы галогенных ламп. Сравнительно большую номенклатуру выпускаемых галогенных ламп можно разделить по назначению на следующие основные группы: 1) для светильников общего освещения и прожекторов; 2) для инфракрасного облучения; 3) для кинофотосъемочного и телевизионного специального освещения; 4) для автомобильных фар; 5) для аэродромных огней; 6) для оптических приборов; 7) для специального применения.

По конструктивным признакам галогенные лампы делятся на две группы: 1) линейные, или трубчатые (тело накала — длинная спираль, отношение длины лампы к диаметру больше 10, электроды обычно расположены с обоих концов лампы); 2) малогабаритные с компактным телом накала (отношение длины лампы к диаметру меньше 8).

В нашей стране приняты следующие обозначения галогенных ламп накаливания: первая буква — материал колбы (К — кварцевая); вторая буква — вид галогенной добавки (И — йод, Г — галоген); третья буква проставляется, если есть необходимость указания области применения (О — облучательная) или конструктивная особенность (М — малогабаритная); первая группа цифр — напряжение (В); вторая группа цифр — мощность (Вт), сила света (кд), ток (А), или световой поток (лм) в зависимости от принятой маркировки для ламп соответствующего типа; последняя цифра — порядковый номер разработки после первой. Примеры обозначения: КГМ 220—500 — кварцевая, галогенная, малогабаритная, на напряжение 220 В, мощностью 500 Вт, первая разработка; КИО 220—2500 — кварцевая, йодная, облучательная, на напряжение 220 В, мощностью 2500 Вт, первая разработка.

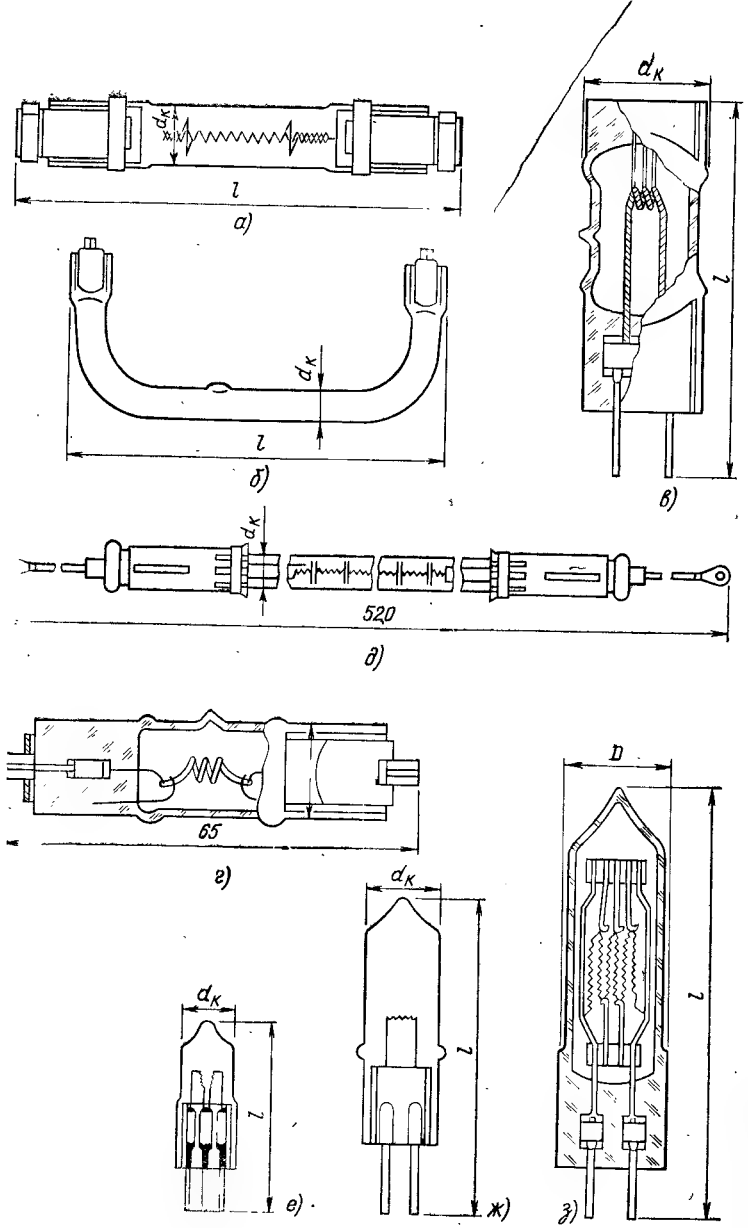


Рис. 10.5. Типичные представители разных групп галогенных ламп накаливания (масштабы разные):

а — КГ220-1000; *б* — КГТО220-2500; *в* — КГМ27-400; *г* — КГМ-30-300; *д* — КГ220-5000; *е* — КИМ6-25+25; *ж* — КИМ12-100; *з* — КГМ220-500

Таблица 10.1 Основные параметры различных групп галогенных ламп накаливания

Тип	Номинальные значения параметров			Срок службы, ч	Размеры, мм, не более	
	Напряжение, В	Мощность, Вт	Световой поток, лм		Диаметр колбы $d_к$	Длина лампы l
1. Линейные галогенные лампы накаливания						
1.1. Для общего освещения						
КГ220-1000-5	220	1000	22 000	2000	10,7	189
КГ220-1500	220	1500	33 000	2000	10,7	254
КГ220-2000-4	220	2000	44 000	2000	10,7	335
КГ220-5000-1	220	5000	110 000	3000	20,0	520
КГ220-10000-1	220	10 000	220 000	3000	26,0	675
КГ220-20000-1	220	20 000	440 000	2000	36,0	890
1.2. Для студийного освещения						
КГ220-500	220	500	13 500	150	11,0	132
КГ220-1000-4	220	1000	26 000	420	11,0	180
КГ220-2000-3	220	2000	54 000	450	11,0	236
КГ220-5000	220	5000	125 000	2000	20,0	520
КГ220-10 000	220	10 000	260 000	2000	27,0	675
1.3. Для термокопировальных и электрографических аппаратов						
КГ220-400	220	400	6400	500	8,0	280
КГТ220-1300-1	220	1300	—	3000	11,0	308
КГТ220-1800	220	1800	—	2000	10,7	400
1.4. Для нагрева излучением*						
КГТД220-400-1	220	400	2300	3000	9	280
КГТД220-600	220	600	2200	2000	12	500
КГ220-1000	220	1000	2500	5000	11	375
КГТД220-1000-1	220	1000	2600	2000	11	240
КГТО220-2000	220	2000	2600	5000	12	500
КГТО220-2500	220	2500	2650	2000	12	500
КГТ380-3300	380	3300	2600	5000	12	750
КГТО380-3550	380	3550	2550	2000	12	750
2. Малогабаритные галогенные лампы на низкое напряжение						
КГМ30-300	30	300	8900	20	14	65
КГМ27-400	27	400	10 800	250	25	85
КГМ6-25+25**	6	25+25	350	2×200	10,7	36
АКГ12-55-1	12	55	1330	300	11,5	42
АКГ24-70-1	24	70	1630	300	11,5	42
КГСМ27-40	27	40	880	500	9,0	40
КГСМ27-85	27	85	1870	500	12,0	51
КГСМ27-150	27	150	3300	500	12,0	51
КГСМ27-200	27	200	4400	300	18,0	100
КГМ6,6-45-1	6,6А	45	765	750	14,5	70
КГМ6,6-65-1	6,6А	65	1560	300	14,5	70
КГМ6,6-100-1	6,6А	100	2000	700	10,7	64
КГМ6,6-200-1	6,6А	200	4400	500	14,0	64

Продолжение табл. 10.1

Тип	Номинальные значения параметров			Срок службы, ч	Размеры, мм, не более	
	Напряжение, В	Мощность, Вт	Световой поток, лм		Диаметр колбы $d_к$	Длина лампы l
3. Галогенные лампы для оптических систем						
3.1. Для проекционных и оптических приборов						
КГМ12-100	12	100	3000	100	11,0	45
КГМ24-150	24	150	4650	50	12,5	45
КГМ24-250	24	250	8500	50	15,5	55
КГМ127-500	127	500	12 000	50	22,0	85
КГМ220-500	220	500	12 000	50	22,0	85
КГМ127-750	127	750	18 750	50	25,0	90
3.2. Лампы с концентрированным телом накала для кинопрожекторов						
КГК110-2000	110	2000	55 000	200	46	220
КГК110-5000	110	5000	156 000	300	65	275
КГК110-10 000	110	10 000	270 000	400	80	410
КГК220-2000	220	2000	58 000	170	46	220
КГК220-3000	220	3000	84 000	220	56	265
КГК220-5000	220	5000	140 000	250	65	275
КГК220-10 000	220	10 000	280 000	270	80	400

*У ламп для нагрева излучением вместо $Ф_v$, лм, нормируется $T_ц$, К.

**Двухспиральная лампа.

Примечания: 1. Лампы первой группы имеют трубчатую (софитную) форму, электроды в них размещаются с обоих концов. В лампах второй и третьей групп (кроме софитной лампы типа КГМ30-300) электроды размещены в одном из концов лампы.

2. Лампы первой и второй групп выпускаются также на напряжение 110 В.

Трубчатые галогенные лампы для светильников общего освещения и прожекторов выпускаются преимущественно на номинальное напряжение 220 В, их мощность составляет от 1 до 20 кВт, световая отдача — 22—26 лм/Вт, срок службы — 2000 ч, положение горения — горизонтальное. Трубчатые лампы для инфракрасного облучения рассчитаны на напряжения 127, 220 и 380 В. Мощность этих ламп — от 0,5 до 5 кВт, срок службы 2500—5000 ч, так как тело накала работает при температурах 2400 –2700 К, положение горения — горизонтальное. Малогабаритные лампы разного назначения выпускаются на напряжение до 30 В (преимущественно 6, 12 и 24 В). Мощность ламп — 15—650 Вт; они имеют компактную форму тела накала.

Поскольку большинство этих ламп должно иметь высокую яркость, температура их тела накала составляет 3000—3200 К, а срок службы — от нескольких десятков до сотен часов; положение горения — любое.

В табл. 10.1 приведены основные параметры, а на рис. 10.5 — конструкции типичных галогенных ламп накаливания различных групп. Номенклатура галогенных ламп в настоящее время превышает 150 наименований.

10.2. РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

При рассмотрении состояния и развития электрических ламп накаливания имеют место три бесспорных факта: во-первых, лампы накаливания широко применяются, их выпуск постоянно растет; во-вторых, они продолжают иметь серьезные недостатки, главными из которых являются сравнительно низкая световая отдача, обычно невысокая продолжительность горения, а также недостаточная механическая прочность некоторых специальных ламп; в третьих, лампы накаливания имеют существенные резервы для повышения их эффективности.

Остановимся на основных из этих резервов:

1) Номинальная световая отдача ламп общего назначения по ГОСТ 2239-79 составляет 6,7—19,1 лм/Вт, хотя теоретически возможная световая отдача вольфрама превышает более чем в 2 раза максимально достигнутую.

2) Критические потери массы тел накала весьма малы. У аргоновых моноспиральных ламп они составляют 8—12 %, а у биспиральных — 4—8 %, в то время как для существенного повышения критической потери в массе, т. е. для более полного и эффективного использования массы тела накала, в принципе, нет ограничений.

3) Лампы накаливания одного и того же типа значительно отличаются друг от друга по сроку службы. Это обстоятельство, обусловленное неоднородностью материалов, процессов и режимов, препятствует использованию резервов по сроку службы, хотя указанные трудности нельзя считать непреодолимыми.

4) Уровень производительности труда на важнейших операциях электролампового производства пока заметно ниже технически возможного, что отражается на важном показателе эффективности ламп — их стоимости.

5) Качество электрической энергии в осветительных сетях, не удовлетворяет требованиям эксплуатации ламп

накаливания, срок службы которых сильно зависит от напряжения сети. Повышенное сверх номинального и нестабильное напряжение в сетях снижает фактическую продолжительность горения ламп накаливания, эффективность их использования.

Таким образом, резервы совершенствования ламп накаливания, причем реальные, имеются в теории, конструировании, производстве, эксплуатации, т. е. на всех стадиях жизненного цикла лампы.

К числу важнейших конкретных работ, направленных на использование резервов, следует отнести те, которые создают предпосылки для *повышения световой отдачи ламп накаливания и их срока службы*. К ним относятся, например, работы по улучшению условий функционирования вольфрамового тела накала в лампе: изучение процесса изменения (старения) материала и конструкции тела накала в процессе горения; исследование дефектов тела накала; выработка и удовлетворение требований к чистоте наполняющих газов; установление предельных норм газовыделения деталей ламп и разработка методов очистки и контроля чистоты деталей; выявление и ликвидация причин, вызывающих электрический разряд в лампе; исследование возвратных циклов материала тела накала.

Необходимо создать новые оптимальные для ламп накаливания марки и режимы производства вольфрама. Требуется повысить равномерность проволок по диаметру, уменьшить дефекты поверхности, обеспечить однородность свойств проволоки разных изготовителей, нормировать количество примесей и температуру рекристаллизации, повысить спирализуемость в «холодном» состоянии и непровисаемость в рабочем режиме тела накала и т. п. Заслуживает внимания применение метода гидроэкструзии при изготовлении вольфрамовой проволоки, которое обеспечивает повышение прочности и пластичности твердых тел под действием высоких давлений. Полученные этим методом образцы молибденовой и вольфрамовой проволок диаметром до 15 мк имеют высокую равномерность свойств по длине и сечению; при этом значительно увеличивается производительность труда при изготовлении проволоки. Актуальными остаются разработка и совершенствование методов и приборов контроля проволок и установления связи между качеством вольфрама и параметрами ламп.

Световую отдачу ламп накаливания можно значительно

повысить, если собрать излучаемую лампой теплоту и использовать ее для подогрева тела накала. В этом случае при сохранении светового потока и срока службы ламп можно было бы уменьшить потребляемую мощность. Для решения этой задачи уже созданы различные пленочные экраны, обладающие свойством отражать инфракрасное излучение и пропускать видимое. Однако достигнутое пока качество таких экранов недостаточно. Когда будут созданы хорошие экраны, возникнет ряд технологических проблем: придание экранам и телам накала необходимых форм; точное расположение их относительно друг друга, обеспечивающее направление отраженного инфракрасного излучения на тело накала; создание высокопроизводительного оборудования и др.

Большой разброс значений срока службы отдельных однотипных ламп накаливания, имеющий место в настоящее время, заставляет создавать излишний запас по сроку службы за счет искусственного снижения световой отдачи. Преодолеть эти недостатки можно повышением уровня производства ламп (оптимизация технологических процессов, повышение точностных характеристик оборудования, автоматизация контроля и регулирования режимов обработки, обеспечение однородности качества исходных материалов и полуфабрикатов и т. д.). Эти вопросы особенно важны при производстве тела накала. Более глубокого теоретического и конструкторско-технологического обоснования требуют, в частности, режимы спирализации, термической и химической обработки и контроля.

Недостатком многих специальных ламп накаливания (автомобильных, самолетных, миниатюрных и др.) является их малая механическая прочность. Проблема повышения механической прочности ламп решается двумя путями: улучшением конструкции и способов монтажа тела накала, а также путем разработки новых специальных марок вольфрама. Так, проведенные исследования сплавов вольфрам—рений, вольфрам—молибден—рений показали, что сплавы такого рода следует считать перспективными.

Несомненно перспективными являются исследования по поиску новых материалов для тела накала тепловых источников света, обеспечивающих существенное повышение световой отдачи. В этом плане интересны, как уже отмечалось во введении, полупроводниковые материалы. Признается реальной, хотя и весьма сложной, задача отыскания металлических материалов (сплавов) для тел накала ламп накаливания с температурой плавления выше, чем у

вольфрама, с заданным спектральным составом излучения и пригодных для ламп накаливания во всех других отношениях.

Не менее важными являются работы по *созданию эффективных ламп накаливания на новых принципах*. Сюда относится, например, разработка ламп накаливания с улучшенным характером распределения излучения по спектру: лампы «холодного» света (с интерференционными пленками на колбе, уменьшающими пропускание тепловых лучей и частично возвращающими их на тело накала); лампы в колбах из неодимового и других стекол с избирательным пропусканием; лампы, в колбы которых вплавляются фильтры из разных материалов, и др.

Продолжаются исследования возможности использования явлений люминесценции в тепловых источниках света. Речь идет о так называемых «антистоксовых» люминофорах, способных при определенных условиях преобразовывать инфракрасное излучение в видимый свет. Нетрудно представить, насколько полезным было бы хотя бы в небольшой степени решить эту задачу, если учесть, что 80—90 % создаваемой лампой накаливания энергии излучения составляет инфракрасное излучение.

Развитие техники варки, формообразования и обработки стекла, нанесения на стекла разного рода покрытий, в том числе интерференционных и зеркальных, совершенствование методов окраски стекол, а также обезгаживания встраиваемых в лампу отражателей делают возможным расширение номенклатуры ламп-светильников, сочетающих в себе лампу и арматуру. Если сделать эти лампы достаточно технологичными и надежными, чему нет принципиальных препятствий, то они станут наиболее перспективным типом ламп накаливания для освещения жилых и ряда других видов помещений. Актуальными являются развитие и совершенствование ламп-фар для автомобилей, самолетов и других целей, зеркальных ламп в прессованных оболочках для освещения, специальных ламп накаливания со встроенными экранами и отражателями и т. д.

Для развития номенклатуры ламп необходимы исследования в области новых материалов: специальных стекол; легированного кварца; прозрачных керамических материалов; механически прочных и жаростойких пленочных материалов; специальных пластмасс для цоколей, изоляторов и, возможно, колб; различных фильтрующих, отражающих, рассеивающих покрытий, обеспечивающих создание ламп

накаливания различной цветности с улучшенными светотехническими качествами.

Весьма важной группой работ является развитие *исследований возвратных циклов* материала тела накала в лампах накаливания. Если бы, например, удалось заставить частицы вольфрама возвращаться на дефектные участки тела накала, то это открыло бы путь для существенного повышения срока службы галогенных ламп. Не менее важной является проблема обеспечения работоспособности галогенных ламп в любом положении.

В последние годы получили развитие работы по *оптимизации параметров ламп накаливания*. Чем это вызвано? Выше отмечалось, что имеется достаточно много резервов совершенствования ламп накаливания и известны многие пути их использования. Однако они выявлены в основном на основе интуитивных оценок. Преодолеть этот недостаток помогает оптимизация, занимающая важное место среди наиболее перспективных способов выявления и реализации резервов.

10.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Оптимизировать — значит находить из многих возможных вариантов (например, из многих возможных конструкций) лучший вариант (конструкцию), который полностью отвечает поставленному условию.

Метод оптимизации целесообразно применять, например, в случае, когда предлагается решить одну и ту же задачу несколькими приемами. Какой из этих приемов лучше, допустим, с точки зрения экономии времени? Ответить на этот вопрос — значит решить задачу оптимизации.

Оптимизация особенно полезна тогда, когда в сферу рассмотрения вовлекается много факторов и когда эти факторы сильно зависят друг от друга. Такие ситуации часто можно встретить и при решении вопросов совершенствования ламп накаливания. Как, например, лучше поступить, проектируя новую лампу накаливания промышленного освещения: сделать ли ее с большим сроком службы и малой световой отдачей или наоборот? Известно, что эти параметры находятся в «жесткой» обратной связи [см. (5.11)] и их невозможно одновременно существенно увеличить. Если предусмотреть большой срок службы при малой световой отдаче, то уровень освещения в цехах может оказаться недостаточным и придется устанавливать дополнительные светильники, что увеличит затраты на закупку новых световых приборов, их монтаж, а также приведет к дополнительному расходу электроэнергии. Если поступить наоборот, то лампы будут часто перегорать, увеличатся затраты на их покупку и замену в светильниках.

Чтобы решить эту задачу, приходится иметь дело с большим количеством связанных друг с другом факторов (параметры ламп, стоимости электроэнергии, светильников и их монтажа, ламп и их смены и т. п.). Метод оптимизации, учитывающий все факторы и связи, помогает найти правильное решение из многих возможных.

Найдено общее (пригодное для любых исходных данных и для многовариантных расчетов) решение и изложенной выше задачи на отыскание оптимальных значений световой отдачи η_V и срока службы τ ламп для промышленного освещения, т. е. таких значений η_V и τ, при которых годовые затраты на сооружение и эксплуатацию промышленной осветительной установки с данными лампами будут минимальными. (Критерий минимальности годовых затрат на осветительную установку является общепринятым в светотехнической практике при решении многовариантных оптимизационных задач.)

В результате проведенных исследований получены следующие выражения для оптимальных световой отдачи $\eta_{V\,опт}$ и срока службы $\tau_{опт}$:

$$\eta_{V\,опт} = \eta_{Vр} \sqrt{\frac{A_э + A_а + A_ч + A_к}{(z-1)\,A'_л}}; \qquad (10.1)$$

$$\tau_{опт} = \tau_р \eta_{Vр}^{z} \eta_{V\,опт}^{-z}, \qquad (10.2)$$

где $\eta_{Vр}$ и $\tau_р$ — расчетные (имеющиеся) световая отдача и срок службы лампы; z — показатель степени в (5.11), равный 6,6—7,7; $A'_л$, $A_э$, $A_а$, $A_ч$, $A_к$ — постоянные для принимаемых в расчете исходных данных, связанные с годовыми эксплуатационными затратами на лампы, электроэнергию, амортизацию, чистку светильников и первоначальными капитальными затратами на осветительную установку и равные:

$$A'_л = (g_л + g_{см})\frac{T_г}{\tau_р} M; \quad A_э = k_{спр} g_э T_г P_р \left(1 + \frac{\Delta U}{100}\right) M;$$

$$A_а = (g_{св} + g_м)\frac{a}{100} M; \quad A_ч = g_ч \frac{12}{t_ч} M; \quad A_к = \frac{g_л + g_{св} + g_м}{T_н} M.$$

В приведенных выражениях: $g_л$ и $g_{см}$ — стоимости одной лампы и ее замены; $T_г$ — число часов использования осветительной установки в год; $k_{спр}$ — коэффициент спроса осветительной установки; $g_э$ — стоимость электроэнергии; $P_р$ — расчетная мощность; ΔU — потеря напряжения в осветительной сети до «средних ламп» (в процентах к номинальному); $g_{св}$ и $g_м$ — стоимости одного светильника и его монтажа; a — амортизационные отчисления (в процентах к стоимости основных фондов); $g_ч$ — стоимость одной чистки осветительного прибора; $t_ч$ — интервал времени между чистками, мес; $T_н$ — нормативный

срок окупаемости капитальных вложений; $M = n_л \eta_V$, где $n_л$ — количество ламп в осветительной установке.

Если в правые части (10.1) и (10.2) подставить все исходные величины, относящиеся к данной проектируемой промышленной осветительной установке, то получим значения $\eta_{V\,опт}$ и $\tau_{опт}$. Лампы с оптимальными значениями световой отдачи и срока службы обеспечат минимум годовых приведенных затрат на осветительную установку, в которой они будут использоваться.

Решены и другие оптимизационные задачи в области ламп накаливания. Например, получены соотношения для нахождения оптимального времени групповой замены ламп в промышленной осветительной установке [1], для определения оптимальной температуры колб ламп накаливания и др.

Главное состоит в том, чтобы при расчете и конструировании ламп методы оптимизации были прочно взяты на вооружение. Технико-экономическая оптимизация должна являться исходным моментом любой работы по созданию и совершенствованию ламп.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

КОНСТРУИРОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Глава одиннадцатая

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМПАХ

11.1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАМП

Виды газоразрядных источников света низкого давления. Газоразрядные источники света низкого давления могут быть подразделены на два вида. В источниках одного из этих видов используется излучение газового разряда, причем видимое излучение может составлять лишь небольшую долю полного излучения разряда. В качестве характерного примера можно привести бактерицидные лампы с колбой из увиолевого или кварцевого стекла. Доля видимого излучения здесь ничтожна в сравнении с излучением в ультрафиолетовой области спектра. В некоторых случаях видимое излучение применять даже противопоказано и для его устранения используют колбы из черного (или синего) стекла. К газоразрядным источникам света низкого давления с полным правом можно отнести серию неоновых ламп: малогабаритные сигнальные лампы (тлеющего разряда); лампы дугового разряда, используемые в качестве аэродромных огней (ДНеСГ 500-1 — дуговая, неоновая, сигнальная, мощностью 500 Вт).

Другим видом источников света низкого давления являются лампы, в которых излучение разряда преобразуется с помощью люминофоров.

К этому виду относятся наиболее массовые, широко распространенные трубчатые люминесцентные лампы дугового разряда низкого давления. Они применяются для освещения промышленных, общественных и жилых зданий. Благодаря большой протяженности и сравнительно небольшой яркости свечения этих ламп ими наиболее удобно освещать помещения высотой до 3 м.

Высокая эффективность люминесцентных ламп, широчайшие области их применения, большой выпуск, превысивший в ряде стран (СССР, США, Япония и др.) рубеж в 100 млн. штук в год, определяют целесообразность сосредоточения внимания именно на этой, наиболее известной газоразрядной лампе. Для анализа особенностей конструирования других газоразрядных источников света низкого давления представляется достаточным останавливаться на касающихся их особенностях по ходу изложения материала, относящегося к люминесцентным лампам.

Принципиальные особенности работы люминесцентных ламп. Конструкция люминесцентных ламп определяется их принципиальными особенностями. Рассмотрим главные из них.

Газовый разряд. Первой особенностью люминесцентных ламп является то, что эти лампы — газоразрядные. Газовым разрядом называется процесс прохождения электрического тока через газы (или пары вещества). В люминесцентной лампе возникает газовый разряд в парах ртути. Носителями тока здесь являются электроны, движущиеся к электроду с положительным потенциалом (аноду), и ионы, идущие к отрицательному электроду (катоду). Процесс зажигания разряда происходит следующим образом. Специально обработанные (оксидированные) электроды ламп, будучи нагретыми, испускают (эмиттируют) электроны. Это явление носит название термоэлектронной эмиссии. Электроны под действием приложенного к лампе напряжения начинают двигаться к аноду и сталкиваются на своем пути с атомами ртути. При столкновении с атомами они могут ионизировать пары ртути, т. е. удалять из атомов валентные электроны. Атом, лишенный одного (или нескольких) валентного электрона, превращается в ион. Каждый из освобожденных электронов может, в свою очередь, ионизировать новый атом и породить новый электрон и новый ион. Электроны, как упругие шары, двигаются между атомами хаотически, но под действием существующего в разряде электрического поля с определенным градиентом потенциала получают направленную к аноду составляющую скорости.

Процесс зажигания разряда в длинной трубке происходит в три стадии: 1) пробой газового промежутка между одним из электродов и стенкой трубки; 2) перемещение плазменного фронта (плазмой называется ионизованный газ с высокой концентрацией заряженных частиц — положительных и отрицательных — в практически одинаковых количествах) вдоль трубки в направлении от первого электрода (с которого произошел пробой на стенку) ко второму

электроду; 3) возникновение дугового разряда между двумя электродами. Две первые стадии разряда — одноэлектродный разряд с малым током (меньше сотых долей ампера) и большим напряжением у катода (40—400 В). Ток разряда в его третьей стадии определяется электрическим сопротивлением питающей лампу цепи, т. е. параметрами балласта.

Образование лавин электронов, зажигание дугового газового разряда сопровождаются резким уменьшением сопротивления газоразрядного промежутка в лампе, скачкообразным ростом рабочего тока разряда, что может привести к перегоранию и разрушению лампы. Для предотвращения этого в цепь лампы вводят балластное сопротивление (например, дроссель). Тогда в момент зажигания разряда ток возрастает, но умеренно. Вольт-амперная характеристика газоразрядных ламп с дуговым разрядом оказывается, как правило, падающей — с ростом тока снижается напряжение на лампе. Установлено, что балластное сопротивление следует выбирать так, чтобы напряжение на лампе было близко к половине напряжения сети: $U_л \approx {}^1/_2 U_с$ (не менее 0,4 по соображениям экономичности пускорегулирующих аппаратов (ПРА), не более 0,65 для получения устойчивых характеристик ламп вне зависимости от колебания напряжения сети).

Процесс ионизации атомов ртути необходим для зажигания разряда. Он активно идет и в период его горения. При этом может случиться, что энергия какого-нибудь электрона будет меньше энергии ионизации. Тогда при столкновении с атомом ее не хватит для удаления из атома валентного электрона, но может оказаться достаточно для его возбуждения — передачи ему энергии электрона, иначе говоря, для перевода атома на более высокий энергетический уровень. В возбужденном состоянии атом может существовать лишь очень короткое время. При возвращении в менее возбужденное состояние происходит излучение с длиной волны, зависящей от рода наполняющих лампу газов или паров металлов и от уровня энергии, которой достиг атом в момент возбуждения. Излучение, происходящее при возвращении атома в исходное положение с уровня, ближайшего к невозбужденному состоянию, называется резонансным излучением.

Ультрафиолетовое резонансное излучение разряда ртутной люминесцентной лампы, достигнув слоя люминофора, нанесенного на ее внутреннюю стенку, возбуждает свечение люминофора (фотолюминесценция). Люминофоры работают, по выражению С. И. Вавилова, как «трансформаторы света». Газовый разряд в парах ртути в смеси с инертным газом оказался наиболее эффективным для создания люминесцентных ламп. При температуре окружающего воздуха 18—25 °С температура стенок люминесцентной лампы равна 40—50 °С. Давление насыщенных паров ртути находится при этом в пределах от 0,13 до 1,3 Па (10^{-3}—10^{-2} мм рт. ст.). Видимая часть излучения разряда при таком давлении составляет всего несколько процентов общего излучения. Основной частью излучения оказывается невидимое ультрафиолетовое излучение. Наиболее интенсивны резонансные линии ртути с длинами волн 184,9 и 253,7 нм. О том, сколь активно идут процессы возбуждения атомов ртути в ртутно-аргонном разряде низкого давления, можно судить по тому, что на каждый акт ионизации приходится 65 актов возбуждения атомов ртути и последующего резонансного излучения с длиной волны 253,7 нм [3]. Это объясняется тем, что для возбуждения атома ртути требуется вдвое меньшая энергия электрона и «сечение»[1] атома для процесса возбуждения гораздо больше, чем для процесса ионизации.

Выход ультрафиолетового излучения уменьшается, если давление паров ртути окажется меньше или больше 0,13—1,3 Па. Это объясняется тем, что, как установил Б. Н. Клярфельд, при очень малом давлении газа наряду с возбуждением резонансного излучения активно идет процесс нагревания стенок трубки-колбы за счет соударения с ними электронов, ионов и атомов газа. По мере роста давления уменьшается доля энергии, идущей на нагревание стенок, и увеличивается интенсивность резонансного излучения разряда. Достигнув максимума при давлении паров ртути 0,13—1,3 Па, резонансное излучение становится далее менее интенсивным, ибо вновь возрастают тепловые потери, но теперь уже не на стенках, а при соударениях в объеме газа, наполняющего лампу. Растет при этом и интенсивность видимого излучения разряда.

Люминесценция. Другая важнейшая особенность люминесцентных ламп — использование в них упомянутого выше свечения люминофоров (люминесценции), возбуждаемого интенсивным ультрафиолетовым излучением ртутного разряда низкого давления. Использование люминес-

[1] Сечение атома, рассматриваемого как бомбардируемая электронами мишень, представляет собой площадь этой мишени; если электрон попадает в нее, то атом возбуждается до какого-либо уровня или ионизируется.

ценции позволило довести КПД источников света до 15—20 %.

Люминофор наносится на внутренние стенки трубок-колб, так что на него попадает все излучение разряда.

Люминофоры для разных видов люминесценции различны по химическому составу и по способу их изготовления. Наиболее массовым, дешевым и в то же время эффективным светосоставом для люминесцентных ламп в настоящее время является галофосфат кальция, активированный сурьмой и марганцем. Его формула приведена в первой главе. Это сложное вещество содержит в себе фосфат кальция, галогены (фтор и хлор) и активаторы (сурьму и марганец). Люминофоры должны легко обезгаживаться, не должны сорбировать наполняющие лампы газы и пары металлов, не должны вступать с ними в химические реакции. Параметры люминофора должны оставаться неизменными как в процессе обработки ламп (стабильность к технологии изготовления ламп), так и во время их эксплуатации (стабильность в процессе горения ламп). Люминофор должен хорошо наноситься на стеклянную поверхность трубки и прочно удерживаться на ней. Для большого числа случаев применения ламп очень важно, чтобы люминофор был дешев, так как его цена в значительной мере определяет себестоимость ламп.

Ламповые заводы получают галофосфатные люминофоры разных марок в виде порошков белого цвета. Они отличаются процентным составом компонентов, особенно галогенов (фтора и хлора) и активаторов (сурьмы и марганца). Это различие сказывается на спектре излучения люминофора. Так, например, галофосфат кальция, активированный одной сурьмой, имеет лишь синюю полосу излучения и используется в смеси люминофоров для ламп типа ЛДЦ (люминесцентная, дневного света, с улучшенной цветопередачей). По мере увеличения количества марганца растет интенсивность оранжевой полосы излучения и соответствующие люминофоры используются для изготовления ламп типов ЛХБ (люминесцентная, холодно-белого света), ЛБ (люминесцентная, белого света) и ЛТБ (люминесцентная, тепло-белого света).

Лампы с улучшенной цветопередачей (типа упомянутой лампы ЛДЦ) изготавливаются с применением не одного, а двух, трех и даже четырех люминофоров. За рубежом они именуются лампами делюкс, супер делюкс, экстра делюкс. Подробнее о них будет сказано в гл. 13. Применение должным образом выбранных типов люминофоров в сочетании с соответствующим подбором рецептуры стекла позволяет изготавливать люминесцентные лампы различных типов и назначений. Если вместо обычного стекла марки СЛ 97-1 (см. табл. 2.1) использовать трубки из увиолевого стекла (СЛ 97-2), содержащего малое количество окиси железа (0,01 % вместо обычных 0,12 %) и пропускающего вследствие этого ультрафиолетовое излучение разряда (с длиной волны менее 300 нм), и не покрывать люминофором стенки трубки, то получим бактерицидную лампу ДБ (дуговая, бактерицидная). Это — газоразрядная лампа низкого давления, используемая для борьбы с вредоносными бактериями для облучения помещений, для обеззараживания питьевой воды и т. д.

Увиолевое стекло с 1 % окиси свинца в своем составе уже не может пропускать резонансное ультрафиолетовое излучение ртутного разряда, но прозрачно для ближнего ультрафиолета с длиной волны больше 300 нм (стекло СЛ 97-3). Если трубки из такого стекла покрыть люминофором, у которого максимум излучения находится в области 300—320 нм, мы получим эритемные люминесцентные лампы (ЛЭ — люминесцентные, эритемные). Эритемные лампы используются в бесфонарных помещениях, в районах Севера — в тех местах, где ощущается ультрафиолетовое голодание. Для этого создаются осветительно-облучательные установки, где часть ламп — обычные осветительные люминесцентные лампы, а часть — эритемные лампы. Такая сложная система должна применяться потому, что доля видимого излучения у эритемной лампы очень мала и установка с одними такими лампами давала бы слишком мало света. Возможно, однако, создание облучательно-осветительных ламп, в которых на трубки из эритемного стекла наносился бы слой из смеси эритемного и оптимального для целей освещения галофосфатного (или иного, специального) люминофора. Такие лампы получили название ламп полифункционального действия.

Другие особенности люминесцентных ламп. Во-первых, это зависимость параметров лампы от температуры окружающей среды, обусловленная изменением давления насыщенных паров ртути в лампе. Оптимальное давление паров ртути около 0,8 Па ($6 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) достигается при температуре жидкой ртути в лампе 35—40 °С. Если ртуть содержится в лампе в виде амальгамы, то оптимальное давление имеет место при 60—90 °С. Другая особенность люминесцентных ламп — снижение световой отдачи с увеличением тока. Поэтому существует оптимальное значе-

ние тока и, соответственно, мощности разряда, приходящейся на единицу поверхности лампы. У ламп повышенной интенсивности с большим током, хотя и удается получить повышенный световой поток для создания высоких уровней освещенности, снижаются световая отдача и срок службы. Для повышения этих параметров применяют специальные катоды, люминофоры и используют другие меры. В люминесцентных лампах можно использовать люминесценцию

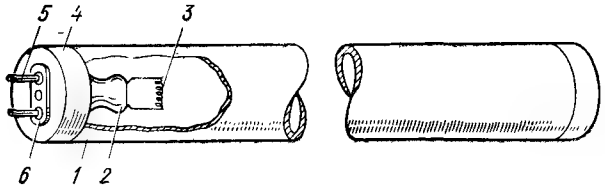


Рис. 11.1. Люминесцентная лампа:

1 — трубка-колба, покрытая люминофором; *2* — ножка со смонтированным на ней катодом; *3* — катод; *4* — цоколь; *5* — штырек; *6* — изолирующая гетинаксовая прокладка

с «фотонным умножением», т. е. с возбуждением всей кристаллической решетки люминофора и излучением, в конечном итоге, более чем одного кванта света на каждый квант возбуждающего излучения (квантовый выход более единицы). Это дает возможность создать нетоксичные безртутные лампы с достаточно высоким световым потоком. Световые параметры таких ламп не зависят от температуры окружающей лампу среды. Важная особенность люминесцентных ламп — возможность варьирования формы трубки-колбы, что позволяет создавать фигурные люминесцентные лампы (U-образные, W-образные, кольцевые и пр.).

Обо всех этих лампах подробнее будет сказано позже. Рассмотренные в настоящем параграфе особенности люминесцентных ламп определяют их конструкцию (рис. 11.1): люминесцентная лампа представляет собой длинную трубку (прямую или изогнутую), внутренние стенки которой покрыты эффективным люминофором; с двух сторон трубки должны быть герметично впаяны ножки *2* со смонтированными на них оксидированными катодами *3*. В современных лампах в качестве катодов используются триспирали (редко — биспирали). Места заварки ножек в трубки должны быть закрыты прочно закрепленными цоколями *4*. На рис. 11.1 приведено, как видим, лишь схематическое расположение элементов лампы, необходимое для правильного представления о ее устройстве. В отличие от него рис. 11.2

представляет собой подлинный элемент конструкторской документации, выполненный в соответствии с правилами ЕСКД.

Здесь, как видно, чертеж лампы выполнен на листе формата II по ГОСТ 2.104-68. На нем приведены название

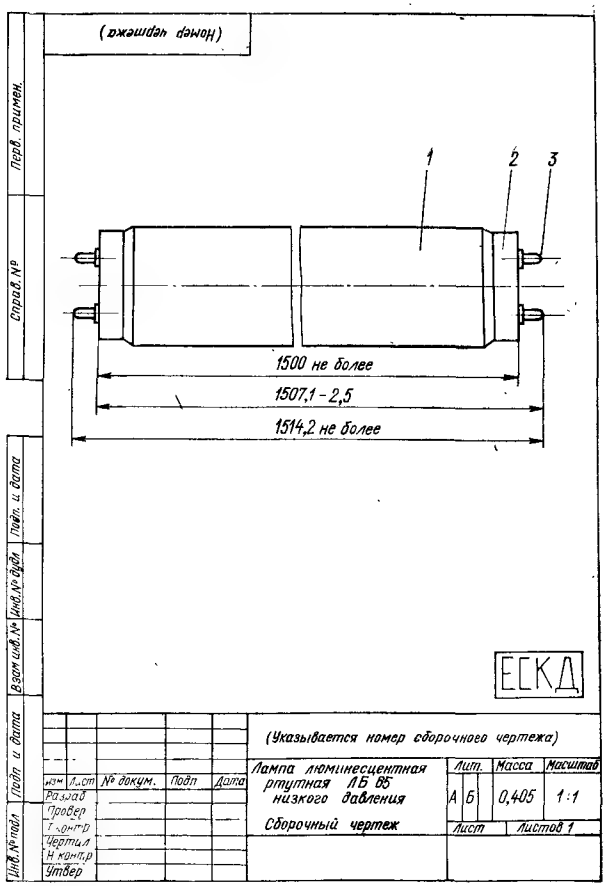


Рис. 11.2. Сборочный чертеж лампы мощностью 65 Вт:

1 — трубка-колба; *2* — цоколь; *3* — штырек

и номер чертежа, имеются подписи разработчика, проверявшего, представителя нормо-контроля и др. Другие чертежи той же серии для упрощения даются без обязательных для них рамок-форматок.

11.2. ВЛИЯНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ НА КОНСТРУКЦИЮ ЛАМП

Схема со стартером и дросселем. Существуют разные виды люминесцентных ламп и их схем включения. Есть лампы с холодными и с подогревными катодами. Лампы эксплуатируются в сетях переменного и постоянного тока, с нормальной частотой (50 Гц) и повышенной частотой (до 50 кГц). Бывают лампы быстрого пуска и мгновенного зажигания.

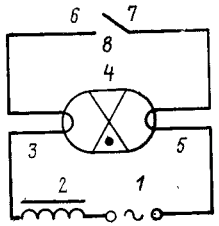


Рис. 11.3. **Схема с дросселем и стартером:**
1 — зажимы для включения сетевого напряжения; *2* — дроссель; *3, 5* — катоды; *4* — лампа; *6, 7* — электроды стартера; *8* — стартер

Наиболее распространена эксплуатация ламп в сетях переменного тока напряжением 127 В, 220 В и 380 В с частотой 50 Гц.

Для облегчения понимания процессов, происходящих при зажигании лампы, рассмотрим простейшую схему включения, содержащую дроссель и кнопку или стартер (рис. 11.3). Кнопка (или стартер) *8* при своем включении вводит в цепь катоды *3* и *5* для их прогрева. При размыкании цепи кнопкой создается импульс напряжения, необходимый для зажигания лампы. Стартер играет роль автоматически действующей кнопки. В СССР распространены стартеры, представляющие собой лампы тлеющего разряда с биметаллическими электродами. Биметаллическая пластинка — двухслойная. Коэффициенты расширения слоев разные. Благодаря этому при нагревании пластинка изгибается в сторону слоя с малым коэффициентом расширения.

В схеме зажигания ламп это свойство биметаллических пластинок используется следующим образом. При включении лампы не хватает напряжения для зажигания разряда, но его достаточно для образования тлеющего разряда между близко расположенными электродами стартера *6, 7*. Его ток (20—50 мА) прогревает биметаллические пластинки, и они изгибаются так, что электроды стартера замыкаются и возникший ток разогревает катоды, тлеющий разряд в стартере при замыкании пластинок гаснет, и они начинают остывать и размыкают схему. В этот момент в лампе зажигается дуговой разряд. Заметим, что когда стартер замкнут (пусковой период), ток течет по двум катодам. В период горения лампы (рабочий период) основная эмиссия электронов идет с «катодного пятна» — наиболее горячей точки оксидного покрытия катода. Катодное пятно вначале находится на стороне токоведущего конца

катода (того конца, с которого ток входит в катод). Работами В. А. Фабриканта и Ф. А. Бутаевой было впервые установлено, что катодное пятно перемещается по катоду в процессе горения лампы, переходя постепенно от токоведущего конца катода к другому его концу (стартерному). Это перемещение происходит по мере израсходования оксида в катодном пятне. Таким образом, в горящей лампе в катодный полупериод ток проходит лишь по части катода, нагревая его джоулевой теплотой. Кроме того, имеет место электронно-ионная бомбардировка катода: в катодный полупериод — положительными ионами, в анодный — электронами. Электронно-ионная бомбардировка и джоулева теплота поддерживают температуру катодов, необходимую для осуществления термоэлектронной эмиссии. Такие катоды называются самокалящимися. Саморегулирующее действие электронно-ионной бомбардировки прогрева катодов джоулевой теплотой и перемещение катодного пятна по мере расходования оксида приводят к тому, что уровень эмиссии электронов, а значит, и электрические параметры лампы остаются практически неизменными в течение всего срока службы ламп. Выход из строя хорошо обработанных люминесцентных ламп происходит по мере израсходования оксида, когда катодное пятно подходит к концу катода, противоположному от токоведущего конца. В зависимости от качества обработки лампы может меняться темп движения катодного пятна, а значит, и срок службы ламп. Заметим, что для уменьшения стробоскопического эффекта и пульсаций светового потока, имеющих место в связи с питанием ламп переменным током, целесообразно включать лампы в разные фазы и применять наряду с индуктивными ПРА емкостные.

Другие схемы включения. Среди большого количества других схем включения следует остановиться на бесстартерных схемах и схемах эксплуатации ламп при повышенной частоте питания. Бесстартерные схемы устраняют такие серьезные недостатки стартерных схем, как мигание ламп в период их зажигания, а также преждевременный выход ламп из строя, происходящий при использовании недоброкачественных стартеров. Бесстартерные схемы подразделяются на схемы быстрого зажигания (быстрого пуска — БП) с предварительным разогревом катодов и схемы мгновенного зажигания. Среди последних существует также две разновидности: с лампами, имеющими холодные катоды (к их числу относятся, например, упоминавшиеся газосветные рекламные трубки); с лампами, катоды которых не прогреваются до включения лампы, но оказываются самокалящимися в процессе их

горения (лампа типа Слимлайн — Slimline). Применение схем мгновенного зажигания требует высокого напряжения питающей сети.

Для обеспечения подогрева катодов в схемах быстрого пуска в большинстве случаев используются дополнительные накальные обмотки в ПРА. Из-за этого бесстартерные ПРА тяжелее и характеризуются повышенными потерями мощности: они сложнее в изготовлении, а потому дороже стартерных ПРА.

За рубежом в схемах быстрого пуска применяют специальные лампы с низкоомными катодами для повышения эффективности ПРА и токопроводящими полосами для облегчения зажигания ламп. В СССР пока нет массового выпуска бесстартерных ламп.

Большим преимуществом бесстартерных схем включения светильников с люминесцентными лампами является высокая надежность их зажигания (при использовании специальных ламп с токопроводящей полосой) в условиях повышенной влажности в помещениях.

При высокочастотном питании (наиболее эффективна частота 18—50 кГц) уменьшаются потери в ПРА, улучшаются световые параметры (повышаются световая отдача и стабильность светового потока), увеличивается срок службы, пульсации светового потока перестают оказывать вредное влияние.

Как видно, выбор схемы включения может потребовать внесения определенных изменений в конструкцию люминесцентной лампы: на лампы быстрого пуска необходимо наносить токопроводящее покрытие (токопроводящую полосу), желательно использовать низкоомные катоды; в лампах мгновенного зажигания могут использоваться холодные катоды; лампа для стартерных схем включения должна иметь двухштырьковые цоколи для предварительного подогрева катодов; лампы для схем повышенной частоты могут изготавливаться из трубок меньшего диаметра.

11.3. ПАРАМЕТРЫ ЛАМП

Размеры. По соображениям взаимозаменяемости длина ламп стандартизована международными соглашениями (рекомендациями Международной электротехнической комиссии — МЭК и стран Совета Экономической Взаимопомощи — СЭВ). В табл. 11.1 приведены стандартные размеры ламп (ГОСТ 6825-74).

Электрические и световые параметры. Предусмотренные стандартом электрические параметры люминесцентных ламп приведены в табл. 11.2.

Световые параметры ламп приведены в табл. 11.3. Обозначения ламп расшифровываются так: Л — люминесцентная; буквы Д, Б, ХБ, ТБ — соответственно дневная, белая, холодно-белая или тепло-белая цветность свечения; Ц — улучшенная цветопередача; 15—80 — номинальная мощность, Вт.

Во втором столбце этой таблицы указаны средние значения светового потока партии ламп после 100 ч горения. Желательно, чтобы

Таблица 11.1

Мощность, Вт	Диаметр, мм	Длина с цоколями, мм (не более)	
		без штырьков	со штырьками
15	27—3	437,4	451,6
20	40—4	589,8	604,0
30	27—3	894,6	908,8
40	40—4	1199,4	1213,6
65	40—4	1500,0	1514,2
80	40—4	1500,0	1514,2

Таблица 11.2

Мощность, Вт	Напряжение, В		Ток, А
	сети	на лампе	
15+1,25	127	54±5,4	0,330
20+1,5	127	57±6	0,370
30+2,0	220	104±10,4	0,360
40+2,5	220	103±10,3	0,430
65+3,75	220	110±11	0,670
80+4,5	220	102±10,2	0,865

для каждой партии поток был на уровне номинальных значений; не допускается снижение его ниже минимальных значений, приведенных в третьем столбце. В отличие от этого в четвертом столбце приведены наименьшие допустимые значения светового потока каждой отдельной лампы из испытуемой партии. Следовательно, лампа, прогоревшая определенный нормированный минимальный срок, обычно составляющий 40% средней продолжительности горения партии ламп, должна иметь световой поток, равный или превышающий указанный в четвертом столбце.

Таблица 11.3

Тип лампы	Среднее значение светового потока, лм		Световой поток каждой лампы после нормированной минимальной продолжительности горения, лм (не менее)	Тип лампы	Среднее значение светового потока, лм		Световой поток каждой лампы после нормированной минимальной продолжительности горения, лм (не менее)
	Номинальный	Не менее			Номинальный	Не менее	
ЛДЦ15	600	560	410	ЛДЦ40	2200	2090	1630
ЛД15	700	630	450	ЛД40	2500	2375	1900
ЛХБ15	800	720	525	ЛХБ40	3000	2850	2250
ЛТБ15	820	730	540	ЛТБ40	3100	2945	2250
ЛБ15	820	780	600	ЛБ40	3200	3040	2490
ЛДЦ20	850	800	630	ЛДЦ65	3100	3000	2500
ЛД20	1000	900	730	ЛД65	4000	3800	2705
ЛХБ20	1020	970	735	ЛХБ65	4400	4180	3165
ЛТБ20	1100	1020	760	ЛТБ65	4650	4410	3310
ЛБ20	1200	1150	940	ЛБ65	4800	4560	3720
ЛДЦ30	1500	1420	1080	ЛДЦ80	3800	3610	2890
ЛД30	1800	1620	1180	ЛД80	4300	4085	3100
ЛХБ30	1940	1840	1395	ЛХБ80	5040	4800	3650
ЛТБ30	2020	1920	1455	ЛТБ80	5200	4950	3745
ЛБ30	2180	2040	1680	ЛБ80	5400	5130	4170

Вместо измерения светового потока в светомерном шаре иногда измеряют силу света I_V (в канделах, кд) лампы в направлении, перпендикулярном ее оси. Зная силу света, легко вычислить световой поток по формуле

$$\Phi_V = 9{,}25 I_V. \qquad (11.1)$$

Разделив световой поток, лм, на подводимую к лампе мощность, получают световую отдачу лампы η_V:

$$\eta_V = \Phi / P. \qquad (11.2)$$

Световая отдача, лм/Вт, характеризует экономичность источника света.

В процессе разработки ламп бывает необходимо оценивать световые характеристики прямо на откачном посту без отпаивания ламп, например, при изучении влияния давления наполняющего газа или его смесей. Это удобно осуществлять измерением яркости лампы в какой-либо точке ее (или в нескольких точках) с помощью селенового фотоэлемента. Тогда для вычисления светового потока ламп пользуются формулой

$$\Phi_V = 9{,}25 \cdot 10^{-4} k_0 d_2 l L, \qquad (11.3)$$

где Φ_V — световой поток лампы, лм; k_0 — коэффициент, учитывающий спад яркости к концам трубки, принимаемый равным 0,92; d_2 — наружный диаметр трубки, см; l — длина светящейся части трубки, см; L — средняя по диаметру яркость в центральной части лампы в перпендикулярном к оси лампы направлении, кд/м^2.

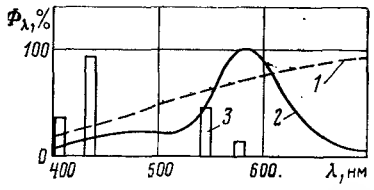
Яркость свечения ламп с нормальной удельной электрической нагрузкой (мощностью, приходящейся на единицу поверхности лампы) обычно находится в пределах $(4—8) \cdot 10^3$ кд/м^2.

Срок службы. В последние годы существенно повышен срок службы люминесцентных ламп. Он увеличился у ламп мощностью 40 Вт с 5000 ч (в 1967 г.) до 13 000 ч; у ламп мощностью 65 Вт — также до 13 000 ч, а у ламп мощностью 15 и 30 Вт — до 15 000 ч.

Стабильность светового потока. При столь высоких сроках службы заметно проявляется снижение светового потока лампы со временем горения. По ГОСТ допустимо снижение светового потока ламп примерно на 20% за период времени, составляющий 40% срока службы, и на 30% — за период, составляющий 70% его. К концу срока службы допускается снижение светового потока на 40%.

Цветность. В ГОСТ, как указывалось ранее, приведено 5 типов ламп по цветности. Лампы дневного света — ЛД с цветовой температурой $T_ц$=6500 К; лампы дневного света с улучшенной цветопередачей — ЛДЦ, близкие по цветности к лампам ЛД, с $T_ц$=6000 К (при освещении этими лампами цвет предметов более близок к их цвету при дневном освещении); лампы холодно-белого света — ЛХБ с $T_ц$=4300 К; лампы белого света — ЛБ с $T_ц$=3500 К и лампы теплобелого света — ЛТБ с $T_ц$=3100 К. Видно, что чем ниже $T_ц$, тем более

теплым воспринимается цвет свечения люминесцентных ламп, потому что они приближаются тогда к таким привычным тепловым источникам света, как лампа накаливания. При этом уместно заметить, что и лампы ЛД, и ЛХБ охотно применяются для освещения в жарких южных странах, так как они в этом случае производят приятное впечатление своим холодноватым светом. Именно поэтому в западных странах с более мягким климатом наиболее широко распространены лампы ЛХБ, а в СССР им предпочитают лампы ЛБ. Лампы же ЛД и ЛТБ не имеют спроса и не включены поэтому в перспективную номенклатуру люминесцентных ламп.



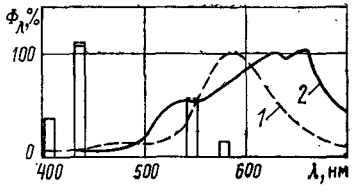


Рис. 11.4. Спектральная характеристика лампы ЛБ40. 100% соответствует 69 мВт/(ср. 10 нм)

1 — спектр абсолютно черного тела с $T_ц$=3500 К; *2* — спектр люминесценции; *3* — спектральные линии излучения ртутного разряда

Рис. 11.5. Спектральная характеристика ламп ЛТБ и ЛТБЦ:

1 — ЛТБ40, 100% соответствуют 62 мВт/(ср. 10 нм); *2* — ЛТБЦ40, 100% соответствуют 37 мВт/(ср. 10 нм)

Цветность ламп можно определить по их спектральным характеристикам. Типичные спектральные характеристики для ламп ЛБ и ЛТБ приведены на рис. 11.4 и 11.5 соответственно. Зная спектральную кривую, мы можем однозначно рассчитать координаты цветности ламп. (Однако одни и те же координаты цветности могут быть у ламп с разной спектральной характеристикой, примером чего являются стандартные лампы и лампы делюкс той же цветности.) В практике разработки и изготовления ламп такой метод не всегда приемлем из-за большой трудоемкости операции измерения спектра ламп. Проще экспериментально определять координаты цветности на специальных приборах — колориметрах.

Оценка цветности ламп по их координатам цветности основана на том факте, что любой цвет может быть составлен из трех других, соответствующим образом выбранных цветов. Математически это сводится к изображению цвета в виде вектора, представляющего собой сумму трех векторов (аналогично тому, как вектором может быть изображена равнодействующая трех приложенных к телу сил). Широко известно, что надлежащим подбором яркостей красного, зеленого и синего цветов можно получить белый цвет. Оказывается, можно подобрать в качестве исходных цветов, задающих любой нужный цвет, и такие, которые образуют трехмерную прямоугольную систему коор-

динат X, Y, Z, в которой любой цвет характеризуется тремя числами — координатами цвета. Для удобства вместо этих трех чисел пользуются отношением координат цвета X и Y к сумме трех координат — модулю цвета, m. Эти отношения $x=X/m$ и $y=Y/m$ называются координатами цветности x, y.

Стандартом предусмотрены координаты цветности ламп, приведенные в табл. 11.4.

Таблица 11.4

Тип ламп	x	y	Тип ламп	x	y
ЛД	0,306—0,320	0,327—0,347	ЛБ	0,393—0,415	0,383—0,409
ЛДЦ	0,315—0,330	0,325—0,350	ЛТБ	0,424—0,444	0,393—0,417
ЛХБ	0,358—0,380	0,364—0,390			

Цветопередача. При конструировании люминесцентных ламп, предназначенных для целей общего освещения в промышленности и дающих белый свет различных оттенков, стремятся получить максимально возможную световую отдачу, для чего и их спектр излучения сосредоточивают в желтой, зеленой и голубой частях спектра, наиболее эффективных для глаза. Недостаток излучения в синей и красной частях спектра вызывает некоторое искажение цвета освещаемых объектов. Для целого ряда применений разработаны люминесцентные лампы с правильной цветопередачей. У них больше доля излучения в красной (610—760 нм) и синей (380—420 нм) областях спектра, ограничивается просвечивание ртутных линий разряда 436, 546 и 577/79 нм, но при этом неизбежно снижается световая отдача по сравнению со световой отдачей обычных ламп. Лампы с улучшенной цветопередачей типа ЛДЦ широко используются в текстильной, полиграфической и других областях промышленности, где обеспечивают хорошую цветопередачу тканей и различных промышленных изделий.

Для освещения жилых помещений, предприятий торговли, общественных зданий созданы лампы ЛЕЦ с $T_ц$=3900 К (люминесцентные, естественного света с правильной цветопередачей). Тщательно проведенная субъективная оценка этих ламп показала, что именно они (из числа ныне существующих ламп) обеспечивают наилучшую цветопередачу человеческого лица, кожи рук, предметов домашнего обихода. По цветности они близки к лампам ЛХБ и лишь незначительно отличаются от них по цветовой температуре (3900 К вместо 4300 К). Для освещения квартир, кафе, ресторанов разработаны лампы ЛТБЦ (люминесцентная, тепло-белого света, с правильной цветопередачей) с $T_ц$=2800 К. Следует заметить, что обеспечиваемая ими цветопередача человеческого лица отличается от цветопередачи при использовании естественного солнечного света. Однако такие лампы импонируют потребителю, поскольку их цветовая температура близка к цветовой температуре привычных ламп накаливания (2400—2600 К).

Для диагностических кабинетов и других лечебных учреждений разработаны лампы ЛХЕ (люминесцентная, холодно-естественного света) с $T_ц$=5200 К (в дальнейшем обозначение будет изменено на ЛХЕЦ). Они обеспечивают передачу не только нормального цвета кожи человека, но и патологические изменения кожи и крови.

Лампы типа ЛДЦУФ (люминесцентная, дневного света, с правильной цветопередачей, с повышенной долей ультрафиолетового излучения) разработаны специально для контроля оттенков белых тканей.

Таблица 11.5

Тип лампы	Среднее значение светового потока, лм		Средний световой поток после 40% службы, лм (не менее)	X	Y
	номинальное	минимальное			
ЛДЦУФ40	1660	1500	1250	0,315—0,330	0,325—0,350
ЛХЕ40	1930	1710	1450	0,330—0,350	0,325—0,350
ЛЕЦ40	2190	1970	1500	0,367—0,397	0,352—0,382
ЛТБЦ40	1700	1530	1070	0,435—0,465	0,380—0,410

Это объясняется тем, что используемые при изготовлении белых тканей отбеливатели меняют свой цвет в зависимости от интенсивности ультрафиолетовой составляющей в падающем на них излучении. Поэтому при искусственном освещении нужна такая же ультрафиолетовая составляющая, как и в естественном дневном свете, чтобы белые ткани выглядели так же, как в естественных условиях.

Электрические параметры ламп с правильной цветопередачей не отличаются от параметров стандартных ламп; световые и цветовые параметры некоторых из них приведены в табл. 11.5.

Таблица 11.6

Тип лампы	Доля светового потока в спектральной зоне (в % от общего светового потока лампы)							
	380—420 нм	420—440 нм	440—460 нм	460—510 нм	510—560 нм	560—610 нм	610—660 нм	660—760 нм
ЛДЦ и ЛДЦУФ	>0,017	>0,4	>0,53	>8,5	<45,8	<38	>8,5	>0,35
ЛЕЦ	>0,01	<0,5	>0,22	>4,8	<42,0	<45,0	>11,0	>0,52
ЛТБЦ	<0,01	<0,37	>0,065	>2,1	<41,6	<45,0	>15,0	>0,65

Примечание. Знак > означает „больше", знак < — „меньше".

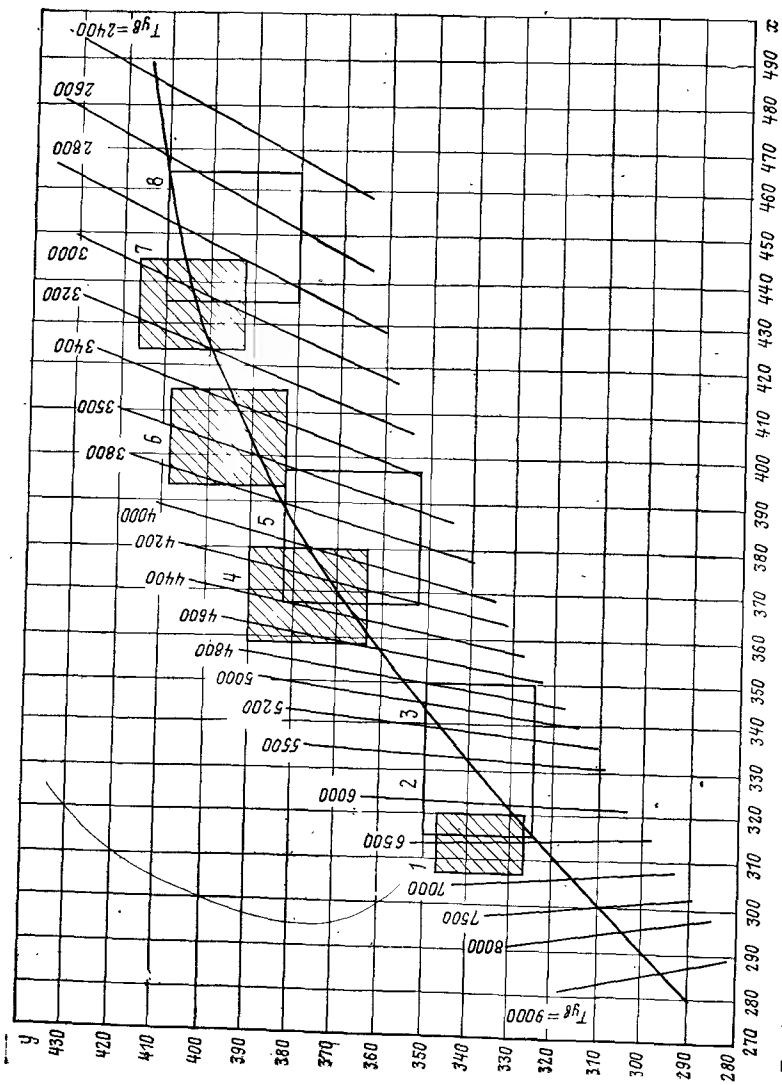


Рис. 11.6. Графическое изображение допусков к координатам цветности стандартных ламп и ламп с улучшенной цветопередачей:
2 — ЛДЦ (ЛДЦУФ); 3 — ЛХЕ; 4 — ЛХБ; 5 — ЛЕЦ; 6 — ЛБ; 7 — ЛТБ; 8 — ЛТБЦ

На рис. 11.6 приведены координаты цветности стандартных ламп и ламп с улучшенной цветопередачей. В настоящее время поля допусков по цветности в виде прямоугольников постепенно заменяются эллипсами.

Оценка качества цветопередачи. Для оценки качества цветопередачи сравнивают спектр излучения лампы с некоторым эталонным спектром. Для этого проводится измерение излучения ламп по спектральным зонам и проверяется соответствие их излучению эталона (по заданным допускам). Нормы распределения светового потока по зонам спектра приведены в табл. 11.6. Как видно, они допускают односторонее отклонение зонального светового потока.

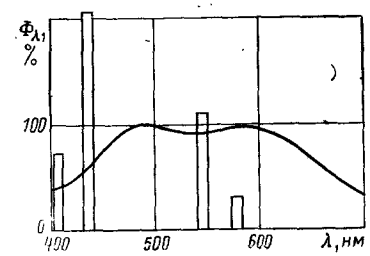


Рис. 11.7. Спектральная характеристика лампы ЛДЦ40, 100% соответствуют 30 мВт/(ср. 10 нм)

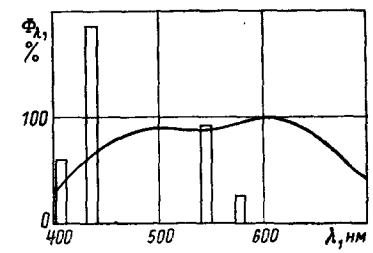


Рис. 11.8. Спектральная характеристика лампы ЛХЕ40, 100% соответствуют 28 мВт/(ср. 10 нм)

Спектральные характеристики ламп ЛДЦ, ЛХЕ, ЛЕЦ и ЛТБЦ приведены на рис. 11.7—11.9 и 11.5. Они наглядно иллюстрируют, как у ламп с улучшенной цветопередачей в спектре излучения ламп увеличена доля излучения в тех областях спектра, где у обычных ламп ЛБ, ЛХБ, ЛТБ имеется недостаток излучения. Сопоставление характеристик ламп ЛТБ и ЛТБЦ на рис. 11.5 показывает, что у ламп ЛТБЦ значительно более заполнены красная и голубовато-зеленая области спектра и уменьшено излучение в желтой части.

К лампам ЛДЦУФ предъявляется еще одно требование, регламентирующее повышенное излучение в ультрафиолетовой области спектра. Указывается, что максимум излучения здесь должен находиться вблизи 355±5 нм и составлять 100±15% основного максимума спектра излучения лампы ЛДЦУФ (490±5 нм).

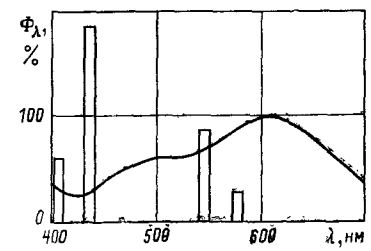


Рис. 11.9. Спектральная характеристика лампы ЛЕЦ40, 100% соответствуют 24 мВт/(ср. 10 нм)

Колориметрическая оценка цветопередающих свойств излучения

ламп более точна. Она предусматривает оценку различия цвета определенных тест-объектов при освещении испытуемой и эталонной лампами. Различие цвета объекта выражается в числе цветовых порогов, и по этому числу рассчитывается затем обобщенный показатель, называемый индексом цветопередачи. Значения общего индекса цветопередачи R_a у ламп ЛДЦ равно 90; ЛХЕ — 93; ЛЕЦ — 85; ЛТБЦ — 88. Чем выше общий индекс, тем лучше качество цветопередачи. Однако кроме общего индекса существуют специальные индексы, которые служат для оценки качества цветопередачи образцов с высокой насыщенностью цвета, а также имитирующих цвет человеческой кожи, зеленого листа и т. д. У ламп с хорошим качеством цветопередачи должны быть высокими и общий, и специальные индексы.

Глава двенадцатая.

КОНСТРУИРОВАНИЕ ТРУБКИ-КОЛБЫ, НОЖКИ И КАТОДА ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ

12.1. КОЛБА ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ

Многообразны факторы, определяющие протекание физико-химических процессов в газовом разряде люминесцентной лампы, в ее оксидном катоде, управляющие механизмом возбуждения и излучения люминофорного слоя, условиями взаимодействия люминофора со ртутью, люминофора со стеклом, воздействием газового разряда на стекло, люминофор, катоды и другие металлические детали лампы. Существенное влияние на параметры лампы оказывают технология ее изготовления [10, 11], условия ее эксплуатации (схема включения, температурные и иные условия окружающей среды и т. д.). Все это привело к тому, что пока не удалось создать строгой теории, позволяющей точно рассчитывать все конструктивные элементы лампы и определять ее технологию так, чтобы можно было гарантировать получение наперед заданных параметров разрабатываемой лампы. В результате конструирование люминесцентных ламп производится путем приближенного расчета параметров конструкции лампы и сочетания расчета с продуманной серией экспериментов.

Умелое сочетание глубокого изучения и разработки вопросов физики и техники люминесцентных ламп с проведением на этой основе широкого экспериментального поиска привело к успешному завершению разработки первых отечественных люминесцентных ламп. Эта работа была удостоена Государственной премии. Лауреатами премии стали президент АН СССР С. И. Вавилов, В. А. Фабрикант, В. Л. Левшин, Ф. А. Бутаева, В. И. Долгополов и М. А. Константинова-Шлезингер. Большой вклад в промышленное освоение ламп внес коллектив инженерно-технических работников Московского электролампового завода.

Теоретическое рассмотрение, кроме всего прочего, дает возможность быстрейшим и надежнейшим путем получать рекомендации по конструированию отдельных узлов и комплектов узлов создаваемых ламп, по их взаимному влиянию друг на друга; оно позволяет определять предельные значения тех или иных параметров ламп и добиваться их реализации. В отдельных случаях бывает полезно сопоставление расчетных и экспериментальных данных, дублирование этих методов для того, чтобы убедиться в правильности и надежности избранного пути.

Назначение трубки-колбы. Трубка-колба люминесцентной лампы выполняет следующие функции: 1) она служит для изоляции газового разряда ламп от окружающего пространства и определяет тем самым форму и геометрические параметры разряда, а значит, влияет на его электрические и оптические параметры; 2) служит местом конденсации избыточной ртути в лампе; температура трубки-колбы определяет давление насыщенных паров ртути и влияет на световые и электрические параметры лампы; 3) несет на себе люминофорное покрытие, от которого в решающей степени зависят световые, цветовые и спектральные характеристики ламп.

Требования к материалу колбы. Стеклянная трубка должна быть: 1) прозрачной в видимой области спектра, а у некоторых типов ламп (например, у эритемных) — и в ближней ультрафиолетовой области; 2) газонепроницаемой для обеспечения сохранности заданного газового наполнения; 3) нагревостойкой в условиях производства и эксплуатации ламп; 4) химически стойкой к парам ртути; 5) способной к обезгаживанию при откачке ламп и не выделяющей вредных газов при работе лампы; 6) дешевой и технологичной в производстве ламп. Трубка должна сохранять заданную форму, обладать достаточной механической прочностью. Стекло должно хорошо спаиваться с ножками, образуя с ними вакуумно-плотные спаи.

В СССР для изготовления люминесцентных ламп применяется, как указывалось в предыдущей главе, стекло марки СЛ 97-1.

Это стекло лишь в первом приближении удовлетворяет перечисленным выше требованиям. Так, было бы желатель-

но проводить более тщательную очистку исходных материалов, что позволило бы на 2—3 % повысить коэффициент пропускания стекла в видимой области спектра, а значит, привело бы к соответствующему увеличению светового потока ламп. Уменьшение количества N_2O и K_2O (содержание которых в стекле 12,5 и 4 % соответственно) привело бы к уменьшению диффузии ионов Na и K в люминофор и улучшило бы за счет этого световые параметры ламп. Стекло подвержено воздействию Hg, ультрафиолетового излучения разряда и чувствительно к электронно-ионной бомбардировке. Это снижает и начальный световой поток ламп, и, видимо, его стабильность в процессе эксплуатации.

Тепловой режим колбы люминесцентной лампы значительно более легкий, чем у лампы высокого давления. Низкая температура колбы люминесцентных ламп позволяет использовать легкоплавкое стекло. Низкое давление наполняющих газов исключает возможность произвольного взрыва колбы даже при очень малой толщине стенки. Лишь для фигурных ламп: U-образных, W-образных, кольцевых — используется стекло с увеличенной толщиной стенки до 1,4—1,6 мм вместо 0,7—0,9 мм для обычных прямых ламп, так как при изгибании трубки ее внешняя сторона растягивается и стенка может оказаться настолько тонкой, что не выдержит давления поддуваемого во время изгибания воздуха и прорвется.

Тепловой режим колбы важен потому, что он определяет упругость паров ртути и за счет этого — световые параметры ламп. Ниже приводится зависимость упругости паров ртути от температуры:

Температура, °C	0	10	20	30
Упругость паров, Па (мм рт. ст.)	0,028 (0,00021)	0,072 (0,00054)	0,17 (0,0013)	0,4 (0,0030)

Продолжение

Температура, °C	40	50	60
Упругость паров, Па (мм рт. ст.)	0,87 (0,0065)	1,8 (0,0134)	3,5 (0,0265)

В предыдущей главе указывалось, что наиболее выгодным с точки зрения выхода резонансного излучения является давление $6 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Как видно, оно имеет место при температуре стенки около 40 °C. Такой должна быть минимальная температура в трубке — температура в наиболее холодной части ее. Существуют искусственные способы обеспечения такой температуры. Так, в люминесцентных

лампах повышенной интенсивности некоторые фирмы вводят специальные отростки, которые выносятся в сторону от оси разряда; другие фирмы создают закатодные области, защищенные теплоизолирующими экранами от горячего катода; более низкая температура в закатодной области создается и при использовании удлиненных ножек. В стандартных лампах необходимости в искусственных способах нет, ибо здесь требуемая температура имеет место в середине трубки.

Выбор рабочего тока разряда, диаметра трубки, давления газа дает возможность управлять этой температурой и подбирать их так, чтобы температура была близкой к 40 °C.

Количественно эти параметры для столба разряда (при исключении из рассмотрения закатодных и прикатодных областей с целью упрощения расчетов) могут быть связаны между собой следующей формулой [5]

$$a_{ст} P_{1ст} = q_{ст} \pi d_2, \qquad (12.1)$$

где $P_{1ст}$ — удельная мощность столба разряда (мощность, деленная на длину столба); $a_{ст}$ — доля мощности столба, затрачиваемая на нагрев трубки; d_2 — наружный диаметр трубки; $q_{ст}$ — тепловые потери с единицы внешней поверхности трубки.

При малых перепадах температур между трубкой и окружающей ее средой, не превышающих 20—30 °C,

$$q_{ст} = C_1 (t_2 - t_0), \qquad (12.2)$$

где t_2 — температура наружной поверхности трубки; t_0 — температура окружающей среды; C_1 — некоторый коэффициент, слабо зависящий от диаметра трубки и температуры окружающей среды. Отсюда

$$P_{1ст}/\pi d_2 = q_{ст}/a_{ст} = C_1 (t_2 - t_0)/a_{ст}. \qquad (12.3)$$

Что касается доли мощности, затрачиваемой на нагрев трубки ($a_{ст}$), то она определяется с учетом того, что на нагрев идет вся та мощность, которая не превращается в поток излучения. Для ртутных люминесцентных ламп низкого давления $a \approx 0{,}8$ [5]. На рис. 12.1 приведена [5] зависимость температуры наружной поверхности трубки люминесцентной лампы от рабочего тока и диаметра трубки, рассчитанная по формуле (12.3). При расчете было принято: $a_{ст} = 0{,}8$; $t_0 = 20$ °C. Как видно из рассмотрения рисунка, температура 40 °C в трубках диаметром 19 мм может быть получена при рассчитанном рабочем токе около 0,15 А

(очевидно, что при меньшем диаметре ток будет еще меньше), в трубке диаметром 25 мм — при 0,25 А, в трубке диаметром 38 мм — 0,48 А. Сопоставим эти токи с фактическими рабочими токами отечественных люминесцентных ламп: 0,175 А в лампах мощностью 13 Вт в трубках диаметром 16 мм; 0,36 А в лампах мощностью 30 Вт диаметром 25 мм; 0,43 А в лампах мощностью 40 Вт в трубках диаметром 38 мм. Как видно, общая закономерность в ходе расчетных и экспериментальных зависимостей совпадает: чем меньше рабочий ток, тем меньше должен быть диаметр лампы.

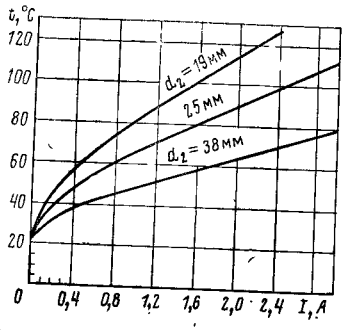


Рис. 12.1. Зависимость температуры стенок лампы от диаметра и тока

Рассмотрим еще один пример, который позволит убедиться в том, сколь полезным может быть использование расчетных данных в процессе конструирования люминесцентных ламп. Предположим, что мы задались целью создать люминесцентную лампу с тем же оптимальным режимом для выхода резонансного излучения, что и у лампы мощностью 40 Вт в трубке диаметром 38 мм, но при длине трубки не 1,2 м, а 1,5 м. По ГОСТ лампы длиной 1,5 м имеют мощность около 65 и 80 Вт. И та и другая — лампы несколько повышенной интенсивности. Какую же мощность должна иметь лампа длиной 1,5 м, сходная по тепловому режиму с лампой 40 Вт? Для этого учтем, что согласно [12] мощность лампы

$$P_л = P_{1ст} l + P_{ак} + P_{эл}, \qquad (12.4)$$

где $P_{1ст}$ — удельная мощность столба; l — длина положительного столба разряда; $P_{ак}$ — потери мощности, обусловленные анодно-катодным падением потенциала; $P_{эл}$ — мощность, выделяемая на омическом сопротивлении электрода.

Для определения $P_{ак}$ учтем, что

$$P_{ак} = kIU_{ак}, \qquad (12.5)$$

где I — рабочий ток; $U_{ак}$ — анодно-катодное падение потенциала; k — коэффициент мощности (для стандартных люминесцентных ламп $k=0{,}9$).

Напомним, что рабочий ток, обеспечивающий температуру 40 °С на стенке трубки диаметром 38 мм, был уже

определен нами по кривым рис. 12.1 и равнялся 0,48 А. Анодно-катодное падение потенциала $U_{ак}$ в стандартных люминесцентных лампах принимается равным примерно 15 В ($U_а \simeq 4 \div 6$ В, $U_к \sim 9$ В). Тогда $P_{ак} = 0{,}9 \cdot 0{,}48 \cdot 15 = 6{,}7$ Вт.

Потери на электродах определяются потерями на сопротивлении отработанных витков спирали и потерями при разогреве всей спирали в анодный полупериод. По данным Е. В. Охонской, $U_{эл} = 3 \div 4$ В. Тогда $P_{эл} = 0{,}9 \cdot 0{,}48 \cdot 4 = 1{,}7$ Вт.

Удельная мощность

$$P_{1ст} = kIE, \qquad (12.6)$$

где E — напряженность электрического поля или градиент потенциала положительного столба разряда (разность потенциалов на единице длины положительного столба разряда).

Длина положительного столба разряда

$$l = (U_л - U_{ак} - U_{эл})/E. \qquad (12.7)$$

Тогда

$$P_{1ст} l = IEkl = [IEk(U_л - U_{ак} - U_{эл})]/E.$$

Поскольку $U_л$ для лампы мощностью 65 Вт, наиболее близкой к искомой и по длине, и по удельной электрической нагрузке, равно 110 В, $U_{ак}$ равно 15 В, а $U_{эл} = 4$ В, то

$$P_{1ст} l = kI(U_л - U_{ак} - U_{эл}) = 0{,}9 \cdot 0{,}48 \cdot (110 - 19) = 39{,}3 \text{ Вт}.$$

Тогда полная мощность лампы

$$P_л = P_{1ст} l + P_{ак} + P_{эл} = 39{,}3 + 6{,}7 + 1{,}7 = 47{,}7 \text{ Вт}.$$

Если мы сопоставим это значение с мощностью лабораторных образцов таких ламп, то убедимся в удовлетворительном совпадении, поскольку последняя обычно оказывается близкой к 50 Вт.

Коэффициент полезного действия (КПД) люминесцентной лампы. На рис. 12.2 приведены данные, характеризующие баланс энергии белой люминесцентной лампы мощностью 40 Вт с люминофорным покрытием из галофосфата кальция.

Как видно из рисунка, в разряде лишь менее 2% энергии идет на видимое излучение и 34,5% — на нагрев электродов и колбы. Оставшаяся часть превращается в резонансное излучение разряда. Доля резонансного излучения от всей энергии, идущей на излучение, невиданно высока: 25,5 : 26,2 = 97%. Энергетический КПД ламп (равно как и их световая отдача) был бы значительно более высоким,

если бы слой люминофора превращал всю эту энергию в свет. Однако большая часть ее (44,6% всей подводимой энергии, что равно 70% энергии, затраченной на резонансное излучение разряда) вновь превращается в теплоту.

В свет преобразуется 7,7 Вт — в виде люминесценции. К этому добавляется 0,7 Вт в виде видимого излучения разряда. В результате 8,4 Вт, или около 20% подводимой энергии, излучается в видимой области спектра, а около 80% ее составляют тепловые потери (24,8% — тепловое излучение; 54,2% отводится в воздух конвекцией и за счет теплопроводности).

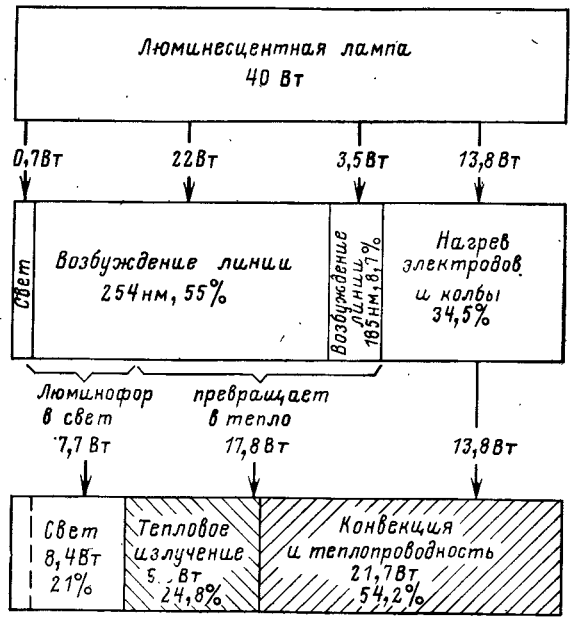


Рис. 12.2. Баланс энергии мощностью 40 Вт белой люминесцентной лампы

Экспериментальные работы по оценке теплового режима люминесцентных ламп. Температура любой точки на поверхности люминесцентной лампы может быть непосредственно определена с помощью плотно прилегающего к ней горячего спая термоэлектрического преобразователя. Экспериментально могут определяться и различные электрические параметры, необходимые для расчетов. Так, с помощью введенных в лампу зондов определяется анодно-катодное падение потенциала, градиент положительного столба разряда (измерив градиенты при разных рабочих токах и диаметрах ламп, мы можем построить графики зависимости градиента от этих параметров); электроизмерительные приборы позволяют непосредственно измерять рабочий ток $I_л$, напряжение на лампе $U_л$, мощность лампы P; прямые эксперименты с варьированием диаметров опытных образцов ламп уточняют полученную расчетным путем зависимость параметров ламп от геометрических размеров колб.

В практике разработки ламп широко используются и расчеты, и эксперименты для получения заданных параметров ламп, в частности для выбора теплового режима трубок.

12.2. НОЖКИ И ЭЛЕКТРОДЫ ЛАМП РАЗНЫХ ТИПОВ

Массовый характер изготовления люминесцентных ламп на высокопроизводительных сборочных линиях привел к необходимости использования в них штампованных гребешковых ножек. По ряду причин представлялось бы интересным применение здесь плоских прессованных ножек, как в радиолампах. Однако сравнительно большие габариты ножек люминесцентных ламп (что определяется размерами последних), большие рабочие токи, которые должны в этом случае проходить по электродам, а также высокая скорость изготовления ламп не дают возможности работать с прессованными ножками без риска растрескивания в производстве ламп и при их эксплуатации. В гребешковой ножке, в отличие от плоской, механические напряжения в стекле, возникающие при изготовлении, компенсируются за счет упругой деформации стенки.

В конструкторской документации на люминесцентные лампы говорится о штампованной ножке и о смонтированной ножке. Штампованная ножка — это ножка, снятая с машины штамповки. Ножка, к которой приварены (или в которую зажаты) катоды и экраны, называется смонтированной ножкой.

Штампованная ножка. На рис. 12.3 изображена штампованная гребешковая ножка люминесцентной лампы. Ножка изготавливается из легкоплавкого свинцового стекла марки СЛ 93-1 (табл. 2.1) с температурой размягчения 500 вместо 550 °С у стекла СЛ 97-1, применяемого для изготовления трубок. Такая разница в температурах размягчения необходима потому, что заварка ножек производится путем разогрева трубки, соприкосновения прогретой части

ее с разверткой тарелки и проваривания образовавшегося шва. Если бы температуры размягчения были одинаковы, то ножка не успевала бы прогреться и шов не мог бы проваривaться должным образом.

На машине штамповки в ножку заштамповывается платинитовая часть электродов лампы.

В конструкторской документации электроды называются выводами. Вывод состоит из никелевой *4* и платинитовой *6* частей (двухзвеньевые выводы) или из никелевой, платинитовой и медной частей (трехзвеньевые выводы). Платинит образовывает с ножечным стеклом вакуумно-плотный спай. Штамповка должна производиться так, чтобы узлы *8*, образовавшиеся при сварке частей вывода, не выходили за пределы лопатки (для предотвращения обрыва выводов и растрескивания лопатки). Легко видеть, что с этой точки зрения двухзвеньевые выводы удобнее, так как надо следить за местоположением лишь одного узла. С другой стороны, в трехзвеньевых выводах расходуется меньше дефицитного материала — платинита.

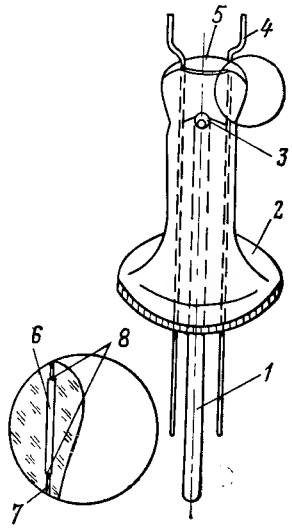


Рис. 12.3. Штампованная ножка люминесцентной лампы:

1 — штенгель; *2* — развертка тарелки; *3* — отверстие в штенгеле; *4* — никелевая часть вывода; *5* — лопатка; *6* — платинитовая часть вывода; *7* — медная часть вывода; *8* — узлы сварки частей вывода

В никелевые части выводов в дальнейшем зажимаются триспиральные (или биспиральные) катоды. Выводы подбираются разными по своему диаметру в зависимости от мощности (а значит, и рабочего тока) лампы: чем больше мощность, тем больше должен быть диаметр проволоки.

Во время штамповки в штенгеле продувается отверстие *3*, через которое производится откачка лампы.

В лампах применяемой в настоящее время конструкции одна ножка имеет продутый штенгель, другая — ложный, непродутый. Он служит для центровки ножки в свече заварочной машины. Перед откачкой он обламывается. Вместо ножек с ложным штенгелем иногда пользуются ножками без штенгеля (для экономии стекла). В этих случаях принимаются дополнительные меры для улучшения

центровки ножек в свечах. Для экономии свинца проводятся эксперименты по изготовлению ножек из бессвинцового стекла.

На рис. 12.4 приведен сборочный чертеж штампованной ножки лампы мощностью 65 Вт с непродутым штенгелем, выполненный по правилам ЕСКД. На рис. 12.5 для сравнения приведен аналогичный чертеж ножки лампы мощностью 150 Вт с продутым штенгелем. На этом рисунке показана дополнительная деталь, появление которой вызвано конструктивными особенностями лампы. Между двумя обычными вводами, служащими для крепления катода, помещен третий электрод, от которого нет вывода наружу. Он служит дополнительной опорой для крепления экрана, охватывающего катод (петлевого экрана). Отметим, что, как видно из рис. 12.4 и 12.5, высота ножки лампы мощностью 65 Вт (расстояние от развертки до конца лопатки) равна 30±1 мм, а для лампы мощностью 150 Вт — 50±1,5 мм. Эта разница будет объяснена позже.

К штампованной ножке предъявляются следующие требования: штенгель и тарелка должны быть соосны; не допускается резко выраженного окисления никелевых частей выводов; не должно быть трещин, особенно вдоль ранта развертки; отверстие у продутого штенгеля должно иметь диаметр, приблизительно равный диаметру штенгеля; узлы сварки частей выводов должны быть углублены в лопатку на 2—3 мм от ее краев; шейка должна быть раздута равномерно; в лопатке вдоль платинита не должно быть пузырей и каналов, по которым может произойти натекание

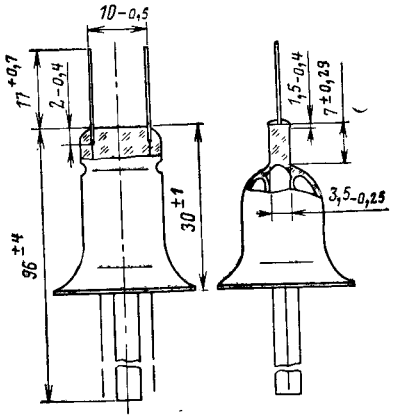


Рис. 12.4. Штампованная ножка лампы мощностью 65 Вт

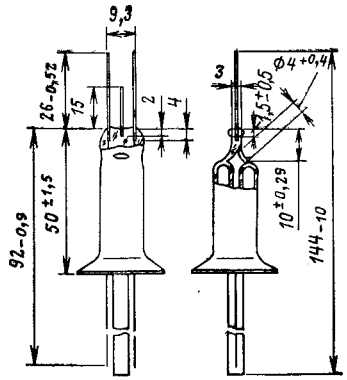


Рис. 12.5. Штампованная ножка лампы мощностью 150 Вт

воздуха в откачанную лампу; напряжения в стекле не должны выходить за пределы нормы (определяется сравнением с эталоном на поляриcкопе).

Собранная ножка. На рис. 12.6 изображены собранные ножки разных типов люминесцентных ламп: ножка стандартной лампы мощностью 40 Вт (рис. 12.6,*а*) и укороченная ножка стандартной лампы фирмы «Филипс» (Голландия) (рис. 12.6,*б*). Преимуществом последней является меньшая высота, за счет чего в лампе с такими ножками уменьшается длина несветящихся концов, соответственно возрастает длина положительного столба разряда, а значит, и световой поток и световая отдача ламп (еще короче были бы прессованные плоские ножки). Укороченные ножки введены и в отечественных лампах с повышенной области. Для этой же цели служит и тепловой экказаны ножки высокоинтенсивных ламп мощностью 150 и 125 Вт, которые, как это отмечено в предыдущем разделе, имеют бо́льшую высоту для создания холодной закатодной области. Для этой же цели служит и тепловой экран *5*, имеющийся на одном из типов ножек ламп мощностью 150 Вт (рис. 12.6,*г*). Ряд ножек имеет экраны: плоские (рис. 12.6,*д*), петлевые (рис. 12.6,*в*) и цилиндрические (рис. 12.6,*г*) для защиты катода в анодный полупериод.

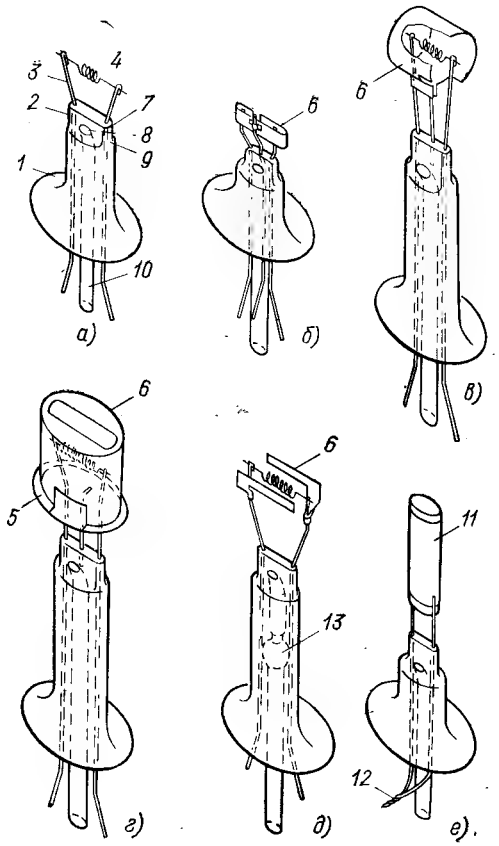


Рис. 12.6. Собранные ножки люминесцентных ламп:

1 — тарелка; *2* — лопатка; *3* — никелевая часть вывода; *4* — катод; *5* — тепловой экран; *6* — экран для защиты катода в анодный полупериод; *7* — платинитовая часть вывода; *8* — отверстие в штенгеле; *9* — медная часть вывода; *10* — штенгель; *11* — холодный электрод газосветной трубки; *12* — вывод газосветной трубки; *13* — шарообразное утолщение в штенгеле для размещения амальгамы

Следует подчеркнуть, что если раньше считалось достижением создание ламп без экранов, то теперь и за рубежом (рис. 12.6,*б*), и в СССР начинают применять экраны в стандартных лампах. Это улучшает внешний вид лампы, так как продукты распыления катода оседают на экранах, а не на стекле колбы. Наличие экранов положительно сказывается на сроке службы ламп.

На рис. 12.6,*е* изображена ножка газосветных трубок с холодными катодами *11*. Это — не подогревный катод, поэтому к нему подводится один вывод *12*, а не два, как это необходимо для ламп с подогревными катодами.

На рис. 12.7 и 12.8 приведены сборочные чертежи ножек ламп мощностью 65 и 150 Вт, входящие в комплект конструкторской документации по системе ЕСКД. На первом

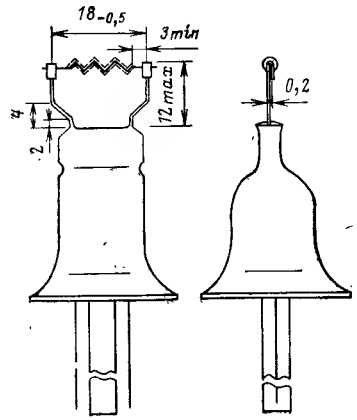


Рис. 12.7. Собранная ножка лампы мощностью 65 Вт;

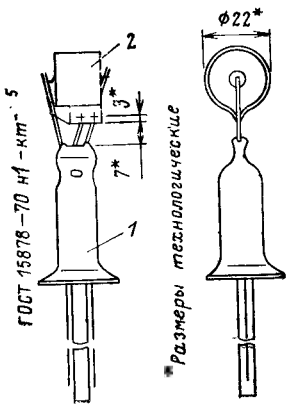


Рис. 12.8. Собранная ножка лампы мощностью 150 Вт:

1 — тарелка; *2* — петлевой экран

рисунке отчетливо видно, что триспиральный катод зажимается в расплющенных концах никелевых частей выводов, а сами выводы делаются фигурными. Расстояние между ними определяется размерами спирали. На втором чертеже показана приварка петлевого экрана к одному из основных выводов и к дополнительному выводу, о котором было сказано при рассмотрении рис. 12.5.

У собранных ножек должна строго выдерживаться заданная геометрия; на никеле и половине тире биспиралей (моноспиралей у биспирального катода) не должно быть оксида; между выводами и экранами должен быть надежный контакт, в то же время спираль не должна быть раздроблена при зажатии или сварке; не должно быть неоксидированных витков, но и между витками триспирали не должно быть оксида; на экранах не должно быть черных пятен и других следов загрязнения.

12.3. КАТОДЫ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ

Электроды люминесцентных ламп работают на переменном токе то в качестве катода (в катодный полупериод), то выполняют функции анода (в анодный полупериод). Однако, чтобы подчеркнуть решающую для лампы роль эмиссии электронов, электроды люминесцентных ламп обычно называют катодами. В то же время, как было показано в § 12.2, в последнее время не только в лампах повышенной интенсивности, но и в стандартных лампах используются экраны, защищающие триспираль (биспираль) в анодный полупериод. Поэтому в этих случаях более приемлемым было бы использование термина анодно-катодные узлы, применяемого ныне рядом разработчиков ламп. Этот термин, равно как и термин «катоды», будет использоваться далее и в настоящем учебнике.

Катод современной люминесцентной лампы разрабатывается с использованием ориентировочных расчетов и контрольных экспериментов. Это объясняется громадным многообразием факторов, определяющих его работу. При зажигании лампы, в пусковой период, катод нагревается пропускаемым по нему током и температура его должна быть оптимальной для зажигания разряда, поэтому катод рассчитывают по уравнению теплового баланса и подбирают опытным путем по пусковому току. В рабочем режиме явления, происходящие на катоде, еще не полностью изучены, особенно в количественном отношении. Усложняется картина и тем обстоятельством, что на переменном токе через каждую половину периода резко меняются условия

работы анодно-катодного узла, то выступающего в качестве катода, то становящегося анодом. С учетом изложенного материал настоящего параграфа сгруппирован в двух разделах: 1) характеристики существующих катодов люминесцентных ламп; 2) поиски путей расчета катодов.

Существующие катоды. Подложкой в массово применяемых триспиральных (биспиральных) катодах является вольфрамовая спираль марки ВА. Эмиттирующим веществом, покрывающим подложку, служит слой окислов щелочноземельных металлов (ЩЗМ). В суспензии, которую наносят на катоды при изготовлении люминесцентных ламп, для этого используются карбонаты ЩЗМ в следующем соотношении: $BaCO_3 : CaCO_3 : SrCO_3 = 50 : 30 : 20$ массовых долей. В суспензию добавляется приблизительно 5% ZrO_2. На откачных автоматах (постах) по катодам откачиваемых ламп пропускается ток. Выделяющаяся при этом джоулева теплота прогревает катоды, что приводит к разложению карбонатов по формуле

$$MeCO_3 \rightleftarrows MeO + CO_2. \qquad (12.8)$$

Как видно, в результате разложения карбонатов образуются окислы металлов и углекислый газ. Углекислый газ может вступать в свою очередь в реакцию с вольфрамовой подложкой и окислами металлов:

$$W + 3CO_2 + 3MeO = Me_3WO_6 + 3CO. \qquad (12.9)$$

Промежуточные слои Me_3WO_6 у поверхности вольфрама отрицательно сказываются в дальнейшем на эмиссии катодов. Их рассасыванию способствует введение в состав оксидной суспензии упоминавшейся выше двуокиси циркония.

Для того чтобы оксидное покрытие стало хорошим эмиттером, оно после разложения карбонатов должно быть активировано малыми примесями самих щелочноземельных металлов. Это превращает его в полупроводник, обладающий малой работой выхода, т. е. требующий малой затраты энергии на удаление из катода эмиттируемых электронов. Для увеличения количества электронов используется также явление термоэлектронной эмиссии — выход электронов с катода при разогреве последнего. В момент зажигания лампы разогрев осуществляется проходящим по катодам током, а в процессе горения разряда — за счет электронно-ионной бомбардировки анодно-катодного узла и прохождения тока по катоду.

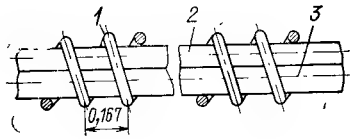
Активирование катодов производится на откачных автоматах частично за счет пропускания тока по катоду (тер-

мическое активирование), частично путем отбора тока эмиссии при зажигании на автомате высоковольтного разряда.

Принципиально возможна замена карбонатов на перекиси щелочноземельных металлов. В этом случае при термообработке происходит преобразование перекисей в окислы:

$$2MeO_2 \rightleftarrows 2MeO + O_2. \qquad (12.10)$$

Выделяемый кислород оказывает положительное влияние на качество люминофорного слоя, а значит, на световой поток лампы и его стабильность. Замена карбонатов перекисями позволяет увеличить количество эмиттирующего вещества, остающегося на катоде после его обработки. Это объясняется тем, что при равном привесе исходного веще-



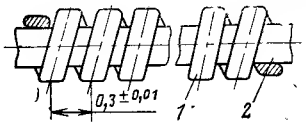


Рис. 12.9. Первичная спираль катода лампы мощностью 65 Вт:
1 — основная вольфрамовая проволока первичной спирали; *2* — вольфрамовая проволока керна; *3* — молибденовая проволока керна

Рис. 12.10. Вторичная спираль (биспираль) катода лампы мощностью 65 Вт:
1 — первичная спираль; *2* — молибденовый керн биспирали

ства катод на перекисях будет иметь больше MeO за счет меньшего количества O_2, выделяющегося из перекисей (в сравнении с большим количеством CO_2, образуемого при разложении карбонатов). Это позволяет повысить срок службы ламп и производительность откачных автоматов.

Имеется тенденция к замене применяемой ныне двуокиси циркония на цирконаты Mg или Ca, что приводит к повышению термоэлектронной эмиссии катодов и срока службы ламп.

Во время горения лампы эмиссия электронов идет в основном с наиболее нагретой части катода, именуемой катодным пятном. Его температура колеблется от 900 до 1300 °C (в среднем 1000 °C). По мере израсходования оксида катодное пятно медленно (в течение всего срока службы ламп, равного 12—15 тыс. ч) перемещается по

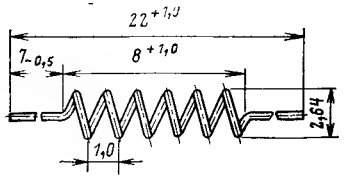


Рис. 12.11. Триспираль лампы мощностью 65 Вт

катоду от исходного положения на одном конце катода к противоположному.

На рис. 12.9—12.11 приведены чертежи первичной спирали, биспирали и триспирали люминесцентной лампы мощностью 65 Вт, выполненные по правилам ЕСКД.

В табл. 12.1 приведены параметры триспиральных катодов некоторых ламп.

Таблица 12.1

Параметры катода	Тип катода	Катод лампы мощностью 65 Вт	Катод лампы мощностью 40 Вт
Диаметр молибденового керна, мкм	Моноспираль	100	80
Диаметр вольфрамового керна, мкм		90	54
Диаметр навиваемой вольфрамовой проволоки, мкм		30	33
Длина моноспирали, мм		280	508
Число витков на 1 мм		6	4
Диаметр молибденового керна, мм	Биспираль	0,35	0,21
Длина биспирали, мм		52	55
Число витков на 1 мм		3,3	4
Диаметр стального керна, мм	Триспираль	0,94	0,87
Длина триспирали, мм		22	21
Число витков на 1 мм		1	1,43
Всего витков		8	10

Как видно из рисунков и табл. 12.1, моноспираль имеет два керна: вольфрамовый и молибденовый. Молибденовые керны моноспирали и биспирали вытравливаются. Зазор между токоведущей вольфрамовой проволокой — керном и навиваемой вольфрамовой проволокой заполняется в дальнейшем оксидом. Вольфрамовый керн должен иметь достаточную площадь сечения, т. е. диаметр, чтобы он выдерживал ток лампы в рабочем и пусковом режимах. Стальной керн триспирали вводится в нее лишь на машине спирализации на период спирализации.

О расчете катодов люминесцентных ламп. В настоящее время накоплен большой материал для проведения расчетов катода люминесцентной лампы [12].

Исследования режимов работы электродов привели к созданию метода расчета катодного пятна. Он базируется на решении системы уравнений, описывающих процессы на электродах и в приэлектродных областях разряда. Метод сложен, требует проведения расчетов на ЭВМ и еще не

вошел в практику разработки катодов. Однако хорошее соответствие результатов расчетов с экспериментальными данными дает надежду, что со временем он будет успешно использоваться разработчиками ламп.

Обеспечение долговечности и надежности катода является главной задачей при его разработке. Окончательный выбор конструкции проводится после экспериментальной проверки долговечности, которая зависит главным образом от температуры катодного пятна $T_{к,п}$ и катодного падения потенциала $U_к$. Значение катодного падения потенциала определяет долю потерь в приэлектродных областях разряда, т. е. влияет на световую отдачу лампы. Прямое определение $U_к$ затруднительно из-за крайне малых размеров зоны катодного падения ($<10^{-2}$ мм). Косвенно можно судить о значении $U_к$ по отношению тока термоэлектронной эмиссии к разрядному току $I_{тэ}:I_р$. Чем больше это отношение, тем меньше $U_к$. О значении $U_к$ можно судить также по интенсивности спектральных линий излучения Ar и по появлению свечения атомов щелочноземельных металлов в прикатодной области разряда. Разработаны методика получения необходимых спектральных характеристик прикатодного свечения и методика определения $I_{тэ}$ по радиошумам в приэлектродных областях разряда ($I_{тэ}=I_р$ в момент исчезновения или резкого снижения радиошумов).

В работе катода важную роль играет возврат щелочноземельных металлов на катод. В катодный полупериод испаряющиеся с катода атомы металлов частично ионизируются и в виде положительных ионов перемещаются к катоду. В анодный полупериод происходит безвозвратное расходование (испарение) оксида. Только с учетом возврата атомов ЩЗМ на катод можно объяснить высокий срок службы, который имеет оксидный катод в люминесцентной лампе. Следует особо подчеркнуть, что при расчете срока службы катода с учетом возвратных циклов, как и при расчете параметров катодного пятна, решение задачи доступно лишь при использовании ЭВМ. Совпадение расчетного и фактического сроков службы при нормальной обработке катодов оказывается довольно хорошим, как это показано в табл. 12.2.

Таблица 12.2

Ток термоэлектронной эмиссии, А	Температура катодного пятна, °С	Срок службы в 3-часовом цикле испытаний, тыс. ч	
		Расчетный	Фактический
0,10—0,12	1022	11—13	13—15
0,04—0,05	1062	4—4,5	8—10

Как видно, лампы с большой термоэлектронной эмиссией (0,10—0,12), которая имеет место при наличии хорошо обработанных (активированных) катодов, характеризуются высоким сроком службы и хорошим совпадением расчетных и экспериментальных данных. У ламп с плохо активированными катодами ($I_{тэ}=0{,}04\div0{,}05$ А) срок службы недостаточен и для них характерно значительное расхождение расчетного и фактического сроков службы. Последнее обстоятельство объяснено непостоянством параметров разряда у плохо обработанных катодов (у них $I_{тэ}$ со временем горения несколько возрастает). Благодаря этому наблюдение за термоэлектронной эмиссией в первые сотни часов горения ламп позволяет оценивать уровень технологии изготавливаемых заводами ламп и создаваемых разработчиками новых образцов их. При еще более высоком $I_{тэ}=0{,}15\div0{,}2$ А срок службы ламп достигает 25—30 тыс. ч. Расчеты показали также преимущество в сроке службы ламп с триспиральным катодом перед лампами с биспиральным катодом, что подтверждается и практикой.

Экспериментальные методики ускоренной оценки срока службы ламп в настоящее время необходимы, поскольку по мере роста гарантируемого срока службы современных ламп испытания становятся все более длительными, а это тормозит внесение полезных идей по усовершенствованию ламп, ибо доказательство полезности таких нововведений чрезмерно затягивается. Поэтому крайне своевременно и актуально применение методов ускоренного определения долговечности катодов. Один из таких методов основан на измерении скорости перемещения катодного пятна вдоль катода в процессе работы лампы. Он позволяет существенно (в 2—3 раза) сократить время испытания ламп. Для ламп с биспиральными катодами оформлен руководящий технический материал (РТМ) по испытаниям ламп этим методом. Им пользуются некоторые разработчики ламп. Наиболее точно положение катодного пятна на катоде определяется пирометрированием, для чего лампы должны иметь окно в люминофорном покрытии, чтобы можно было видеть катод. Косвенный способ оценки положения катодного пятна основан на измерении напряжения между штырьками цоколя горящей лампы. Чем больше это напряжение, тем дальше катодное пятно от своего первоначального положения, т. е. тем больше израсходован ресурс катода. Недостаток этих методов заключается в том, что в них предполагается постоянство скорости расхода ресурса катода на протяжении всего срока службы. На самом деле это не так.

Предварительный вывод о том, выдержат ли лампы с разрабатываемыми катодами заданный срок службы, можно сделать по графику выхода из строя первых же ламп проверяемой партии. При этом следует иметь в виду, что до 40% полного срока службы должна догорать каждая лампа. Легко видеть, что требование по долговечности будет выполняться тем надежнее, чем выше «запас прочности», т. е. чем дальше отстоит от 40% срока службы фактическое время выхода из строя первых (и последующих) ламп партии. В качестве примера приведем результаты испытаний на ПО Армэлектросвет долговечности ламп ЛБ30. У них «запас прочности» превышает 1000 ч, поскольку выход ламп из строя в разных партиях начинается через 7000—9000 ч при сроке службы по ГОСТ 15 000 ч (40% — 6000 ч).

Необходимо упорно и настойчиво продолжать работы по усовершенствованию метода ускоренных испытаний с тем, чтобы превратить его в настольный рабочий инструмент для разработчиков ламп, способный существенно облегчить задачу конструирования новых, более совершенных катодов.

Глава тринадцатая

ЛЮМИНОФОРЫ, ГАЗОВОЕ НАПОЛНЕНИЕ, ЦОКОЛИ, ТОКОПРОВОДЯЩЕЕ ПОКРЫТИЕ

13.1. ЛЮМИНОФОРЫ

Галофосфатные люминофоры. Технические требования к люминофорам. Как уже указывалось в главе 11, наиболее эффективным и широко распространенным люминофором для массовых люминесцентных ламп является галофосфат кальция (ГФК), активированный сурьмой и марганцем. Большой объем сведений о физико-химических свойствах, параметрах, способе производства и новых разработках галофосфатных и других ламповых люминофоров приведен в [13]. Галофосфат кальция используется в наиболее массовых лампах ЛБ и выпускается сотнями тонн. Технические требования нормативной документации на люминофоры состоят в следующем: 1) яркость свечения у испытуемой партии люминофора должна быть не ниже, чем у типового образца люминофора; 2) длины волн максимумов полос излучения Sb и Mn должны быть 480 и 581±2 нм соответственно, а их процентное соотношение — 22%±3%; 3) гранулометрический состав порошка должен быть таким, чтобы содержание частиц размером 14 мкм (и более) не превышало 15% состава.

Помимо требований, проверяемых непосредственно при изготовлении люминофора на химических заводах, имеются дополнительные требования по световой отдаче, стабильности светового потока и цветности ламп, изготавливаемых с применением этого люминофора. Световая отдача лампы ЛБ40 не должна быть меньше 80 лм/Вт, спад светового потока за 100 ч горения не должен превышать 3%, а за 40% срока службы — 15%, координаты цветности ламп должны удовлетворять требованиям ГОСТ на лампы. Эти параметры могут проверяться либо на ламповых заводах, либо на специальных участках химических заводов.

Почему возникла необходимость введения указанных дополнительных требований? Ведь, казалось бы, бесспорна закономерность: чем выше яркость свечения люминофора, тем больше будет световая отдача изготовленных ламп. Однако это справедливо лишь при прочих равных условиях. В то же время часто бывает, что при высокой исходной яркости люминофор в процессе изготовления ламп портится, например, при размоле и термической обработке, связанной с выжиганием биндера. Термическая нестабильность ГФК проявляется, в частности, если имели место отклонения в температуре синтеза люминофора на химических заводах, когда активаторы не полностью растворяются в основе люминофора. Тогда не будет ничего удивительного в том, что световая отдача ламп может получиться разной при использовании люминофоров равной яркости. Разной может оказаться и радиационная стойкость партий люминофора, что приводит к большему спаду светового потока ламп в процессе их эксплуатации. Вышеописанная нестабильность люминофора проявляется и в изменении цветности ламп. Поэтому необходима проверка в лампах не только светового потока, но и координат цветности для каждой партии люминофора.

Итак, должна существовать возможность выбраковывания тех партий люминофора, на которых нельзя получить годные лампы, при условии изготовления этих ламп одновременно с лампами на люминофоре типового образца. Особенно нужна уверенность в воспроизводимости параметров ламп при использовании разных партий люминофора при конструировании новых ламп. Поэтому и в технических условиях на люминофоры других марок следует сохранять требования, относящиеся к параметрам ламп,

изготавливаемых по определенной технологии с применением этих люминофоров.

Лампы типов ЛД, ЛХБ и ЛТБ изготавливаются с использованием разных марок ГФК. В лампах ЛДЦ применяются смеси люминофоров, в которые составной частью входят и галофосфатные люминофоры.

Главное отличие марок ГФК, используемых в производстве каждого типа ламп, состоит в соотношении сурьмяной (λ_{max}=480 нм) и марганцевой (λ_{max}=580 нм) полос излучения люминофора. Так, люминофор ЛГ-3К, применяемый при изготовлении ламп ЛДЦ, вообще не имеет, как было отмечено в гл. 11, марганцевой полосы. Здесь активатором служит одна сурьма. Лампы ЛД изготавливаются на люминофоре ЛГ-2. Максимум сурьмяной полосы здесь составляет приблизительно 90% от максимума марганцевой полосы. Лампы ЛХБ изготавливаются на люминофоре ЛГ-6 с соотношением около 40%, лампы ЛБ — на люминофоре ЛГ-1-2 с соотношением около 22%, лампы ЛТБ — на люминофоре ЛГ-5 с соотношением полос 12%. Аналогичны люминофоры ЛГ-1—ЛГ-5, галофосфатные люминофоры марок ФЛ-580-3500-1 (фотолюминофор с максимумом спектральной характеристики при λ=580 нм, для ламп ЛБ с цветовой температурой 3500 К, первая модификация), ФЛ-580-2800-1 (для ламп ЛТБ с цветовой температурой 2800 К) и др. Спектры излучения ламп были приведены ранее на рис. 11.4, 11.5 и 11.7.

Расчетная оценка предельной световой отдачи люминесцентных ламп. Предельные световые параметры люминесцентных ламп могут быть рассчитаны по [5] с необходимой степенью точности. Это дает возможность видеть перспективу, знать, каково пока отставание от предельных возможностей, к чему следует стремиться. Световой поток люминесцентной лампы определяется равномерным по длине свечением в области положительного столба разряда и поэтому пропорционален удельному световому потоку, т. е. световому потоку на единицу длины столба. Положительный столб разряда низкого давления в трубке постоянного сечения является однородным, так как характеризуется постоянными по длине значениями градиента потенциала, удельной мощности и удельного потока излучения разряда. После преобразования излучения разряда в люминофорном покрытии трубки получается световое излучение лампы. Удельный световой поток $\Phi_{1ст}$ можно рассчитать по формуле

$$\Phi_{1ст} = 680 U \bar{\eta}_{сл} \sum_{\lambda=185 \text{ и } 254 \text{ нм}} Y(\lambda) A_{уф}(\lambda) \Phi_{1ст}(\lambda) + 680 \sum_{\lambda \text{ вид}} \eta_{сл}(\lambda) V(\lambda) \Phi_{1ст}(\lambda), \qquad (13.1)$$

где 680 — максимальная спектральная световая эффективность излучения, лм/Вт; V — относительная световая эффективность излучения люминесценции; $\bar{\eta}_{сл}$ — КПД слоя люминофора; $Y(\lambda)$ — энергетический КПД преобразования возбуждающего излучения с длиной волны λ: $Y(\lambda) = \eta_{кв}(\lambda) R(\lambda)$, где $\eta_{кв}(\lambda)$ — квантовый выход излучения при возбуждении излучением с длиной волны λ; $R(\lambda)$ — квантовое отношение — отношение средней энергии фотона люминесценции к энергии возбуждающего фотона с длиной волны λ, т. е.

$$R(\lambda) = h\bar{\nu}_{люм}/h\nu_{уф} = \lambda_{уф}/\bar{\lambda}_{люм},$$

причем средняя длина волны люминесценции определяется соотношением

$$\bar{\lambda}_{люм} = \frac{\int \Phi(\lambda)\, d\lambda}{\int \frac{1}{\lambda} \Phi(\lambda)\, d\lambda},$$

$A_{уф}(\lambda)$ — коэффициент использования возбуждающего излучения (или эффективный коэффициент поглощения), равный отношению потока возбуждающего излучения с длиной волны λ, поглощенного слоем, к полному потоку излучения с той же длиной волны; $\Phi_{1ст}(\lambda)$ — удельный поток излучения резонансных и видимых линий в столбе разряда; $\eta_{сл}(\lambda)$ — КПД слоя люминофора при возбуждающем излучении с длиной волны λ; $V(\lambda)$ — относительная световая эффективность излучения линий ртутного разряда.

Первый член уравнения (13.1) — удельный световой поток, определяемый слоем люминофора, второй — определяемый видимыми линиями ртути.

Для удобства расчетов подставим в уравнение (13.1) значение $Y(\lambda) = \eta_{кв}(\lambda) R(\lambda)$:

$$\Phi_{1ст} = 680 V \bar{\eta}_{сл} \sum_{\lambda=185 \text{ и } 254 \text{ нм}} \eta_{кв}(\lambda) R(\lambda) A_{уф}(\lambda) \Phi_{1ст}(\lambda) + 680 \sum_{\lambda \text{ вид}} \eta_{сл}(\lambda) V(\lambda) \Phi_{1ст}(\lambda). \qquad (13.2)$$

Световую отдачу столба найдем, разделив уравнение (13.2) на удельную мощность столба $P_{1ст}$:

$$\eta_{V\,ст} = 680V\eta_{сл} \sum_{\lambda=185 \text{ и } 254 \text{ нм}} \eta_{кв}(\lambda)\,R(\lambda)\,A_{уф}(\lambda)\,\eta_{ст}(\lambda) + 680 \sum_{\lambda \text{ вид}} \eta_{сл}(\lambda)\,V(\lambda)\,\eta_{ст}(\lambda), \qquad (13.3)$$

где $\eta_{Vст} = \Phi_{1ст}/P_{1ст}$.

Рассчитаем по этой формуле максимальную световую отдачу положительного столба лампы ЛБ40 на галофосфатном люминофоре, приняв по [5]: $\eta_{кв}=1$; $A_{уф}=1$; $\eta_{сл}=0{,}9$; $V=0{,}546$; $R_{254}=0{,}45$ и $R_{185}=0{,}33$; $\eta_{ст254}=0{,}65$; $\eta_{ст185}=0{,}1$; второй член уравнения (13.3) равным 6 лм/Вт. Тогда

$$\eta_{Vст\,max} = 680 \cdot 0{,}546 \cdot 0{,}9(1 \cdot 0{,}45 \cdot 0{,}65 + 1 \cdot 0{,}33 \cdot 0{,}1) + 6 = 336(0{,}293 + 0{,}033) + 6 = 98{,}5 + 11{,}6 + 6 = 117 \text{ лм/Вт}.$$

Зная $\eta_{Vст\,max}$, легко определить световую отдачу лампы, так как

$$\eta_{Vл} = \eta_{Vст}[1 - (U_{ак} + U_{эл})/U_{л}]. \qquad (13.4)$$

Подставим в (13.4) $U_{ак}+U_{эл}=19$ В и $U_{л}=103$ В (ГОСТ 6825-74). Тогда:

$$\eta_{Vл} = 117(1 - 19/103) = 117(1 - 0{,}185) = 117 \cdot 0{,}815 = 95 \text{ лм/Вт}.$$

Эта величина окажется больше, если мы учтем, что квантовый выход люминофора при возбуждении его излучением с $\lambda=185$ нм выше квантового выхода при $\lambda=253{,}7$ нм и, по данным Ф. А. Бутаевой [14], может оказаться больше единицы.

При использовании редкоземельных узкополосных люминофоров возрастает величина V (относительной световой эффективности), благодаря чему предельная световая отдача ламп на таких люминофорах окажется еще более высокой.

В то же время световая отдача выпускаемых ныне люминесцентных ламп значительно ниже. Это объясняется главным образом тем, что квантовый выход люминофора обычно меньше единицы, а не равен ей, как мы положили в приведенном выше расчете. Не равен единице и $A_{уф}$, ибо не все возбуждающее излучение поглощается слоем для превращения люминофором в свет. В результате фактическая световая отдача современных люминесцентных ламп

ЛБ40 находится, как было сказано ранее, на уровне 80 лм/Вт. При этом она непрестанно растет. На рис. 13.1 приведены данные о том, как из года в год неуклонно повышались фактический световой поток и срок службы отечественных люминесцентных ламп ЛБ, что нашло отражение в соответствующих (по годам) изменениях стандартов на лампы. С учетом изложенного световые отдачи порядка 120—130 лм/Вт, прогнозируемые в литературе для ламп с узкополосными люминофорами, не представляются чрезмерно завышенными.

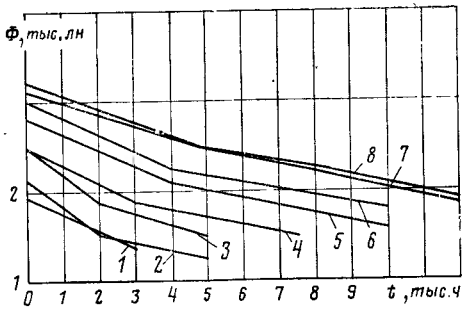


Рис. 13.1. Динамика роста светового потока и срока службы отечественных ламп ЛБ40:

1 — 1954 г.; *2* — 1961 г.; *3* — 1967 г.; *4* — 1968 г.; *5* — 1971 г.; *6* — 1972 г.; *7* — 1977 г.; *8* — 1981 г.

Другие ламповые люминофоры. Люминофоры для ламп с улучшенной цветопередачей (делюкс). Люминофорная суспензия для всех разработанных в СССР ламп делюкс (супер делюкс) изготавливается с использованием нескольких люминофоров (от двух люминофоров для ламп ЛДЦ и ЛЕЦ до четырех люминофоров для ламп ЛТБЦ). Аналогично положение и за рубежом. Наиболее правильной организацией производства для ламповых заводов было бы использование готовых смесей люминофоров. Однако химическая промышленность их еще не всегда выпускает и ламповым заводам все еще приходится самим составлять такие смеси. В этом случае кроме проверки параметров люминофора, аналогичной описанной в предыдущем разделе, необходимо производить подбор цветности ламп на основе смешения заданных люминофоров.

Такой подбор может осуществляться с учетом правил аддитивного сложения цветов по формулам [15]

$$\frac{Y_2 - y}{y - Y_1} = \frac{X_2 - x}{x - X_1} \qquad (13.5)$$

и

$$\frac{\eta_{V1}}{\eta_{V2}} = \frac{(Y_2 - y)\,Y_1}{(y - Y_1)\,Y_2}, \qquad (13.6)$$

где X_1, X_2, Y_1, Y_2 — координаты цветности ламп, изготовленных из исходных люминофоров; x, y — координаты цветности искомой лампы на смеси исходных люминофоров; η_{V1}, η_{V2} — световые отдачи ламп из исходных люминофоров.

Простой расчет координат цветности для смеси люминофоров по этим формулам дает достаточно точные результаты, если составляющие люминофоры входят в смесь в равных количествах. Проиллюстрируем сказанное на простейшем примере смеси из двух люминофоров для ламп ЛДЦ. Значения Y_1, Y_2, X_1, X_2, η_{V1}, η_{V2} приведены в табл. 13.1.

Преобразуем формулу (13.6) следующим образом:

$$\frac{Y_2 - y}{y - Y_1} = \frac{\eta_{V1}}{\eta_{V2}}\,\frac{Y_2}{Y_1} = Q. \qquad (13.7)$$

Тогда и формулу (13.5) можно будет записать так:

$$\frac{Y_2 - y}{y - Y_1} = \frac{X_2 - x}{x - X_1} = Q. \qquad (13.8)$$

Отсюда

$$Y_2 - y = Qy - QY_1; \quad X_2 - x = xQ - QX_1;$$

$$y(Q+1) = Y_2 + QY_1; \quad x(Q+1) = X_2 + QX_1;$$

$$y = \frac{Y_2 + QY_1}{Q+1}; \quad x = \frac{X_2 + QX_1}{Q+1}.$$

Вычислим теперь значение Q, подставив в формулу (13.7) значения η_{V1}, η_{V2}, Y_1, Y_2 из табл. 13.1:

$$Q = \frac{53}{55} \cdot \frac{0{,}375}{0{,}300} = 0{,}965 \cdot 1{,}25 = 1{,}21.$$

Тогда

$$y = \frac{Y_2 + QY_1}{Q+1} = \frac{0{,}375 + 1{,}21 \cdot 0{,}300}{2{,}21} = \frac{0{,}375 + 0{,}363}{2{,}21} = 0{,}332;$$

$$x = \frac{X_2 + QX_1}{Q+1} = \frac{0{,}400 + 1{,}21 \cdot 0{,}225}{2{,}21} = \frac{0{,}400 + 0{,}271}{2{,}21} =$$

$$= 0{,}304.$$

Сопоставим полученные значения координат цветности $x = 0{,}304$ и $y = 0{,}332$ со средними значениями из приведен-

Таблица 13.1

Тип ламп	Тип люминофора, марка, ТУ	Формула люминофора	% в смеси	Светоэ отдача лампы мощностью 40 Вт после 100 ч горения, лм/Вт	Координаты цветности лампы мощностью 40 Вт на данном люминофоре		Длина волны в максимуме
					x	y	
ЛДЦ	Галофосфат кальция, активированный сурьмой (ЛГ3К), ТУ 6-09-2377-72	$3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(F, Cl)$—Sb	50	53	0,225	0,300	490
	Ортофосфат кальция, цинка, активированный оловом (Л42ДН), ТУ 6-09-1937-72	$(Ca \cdot Zn) \cdot (PO_4)_2$—Sn	50	55	0,400	0,375	605
ЛДЦУФ	Пирофосфат бария, активированный титаном (ЛФ-490-1), ТУ 6-09-4092-75	$Ba_2 \cdot P_2O_7$—Ti	40	60	0,255	0,315	490
	Ортофосфат кальция, цинка, активированный оловом (Л42ДН), ТУ 6-09-1937-72	$(Ca, Zn)(PO_4)_2$—Sn	50	55	0,400	0,375	605
ЛБЦ	Дисиликат бария, активированный свинцом (Л33), ТУ 6-09-3509-79	$Ba \cdot Si \cdot O_5$—Pb	10	5	—	—	350
	Пирофосфат бария, активированный титаном (ЛФ-490-1), ТУ 6-09-4092-75	$Ba_2 \cdot P_2O_7$—Ti	10	60	0,255	0,315	480
ЛХЕ	Ортофосфат кальция и цинка, активированный оловом (Л42ДН), ТУ 6-09-1937-42	$(Ca, Zn)(PO_4)_2$—Sn	90	55	0,400	0,375	605
	Пирофосфат бария, активированный титаном (ЛФ-490-1), ТУ 6-09-4092-75	$Ba_2 \cdot P_2O_7$—Ti	47	60	0,255	0,315	480
ЛТБЦ	Ортофосфат магния, стронция, активированный оловом (ЛФ630), ТУ 6-09-31-46-72	$(Mg \cdot Sr)_3(PO_4)_2$—Sn	53	48	0,480	0,385	630
	Пирофосфат бария, активированный титаном (ЛФ-490-1), ТУ 6-09-4092-75	$Ba_2 \cdot P_2O_7$—Ti	4	60	0,255	0,315	480
	Силикат цинка, активированный марганцем (К35), ТУ 6-09-1458-76 (willemite—тит)	$Zn_2 \cdot SiO_4$—Mn	7	80	0,235	0,620	525
	Ортофосфат магния, стронция, активированный оловом (ЛФ-630), ТУ 6-09-31-46-72	$(MgSr)_3(PO_4)_2$—Sn	82	48	0,480	0,385	630
	Фторгерманат магния, активированный марганцем (Л40), ТУ 6-09-2407-78	$3,5MgO \cdot 0,5MgF_2 \cdot 1,0GeO_2$—0,02Mn	7	15	0,500	0,300	656

ных в § 11.3 данных по ГОСТ 6825-74 для ламп ЛДЦ: $x=0{,}323$; $y=0{,}338$. Как видно, расчетные данные близки к фактическим данным, полученным в ходе разработки ламп ЛДЦ. Если бы они отличались от желаемых, то надо было бы добавить в смесь соответствующего люминофора.

Данные о люминофорах для разработанных в СССР ламп с улучшенной цветопередачей приведены в табл. 13.1.

Заданные параметры ламп можно получить и при замене одного или нескольких люминофоров другими, более эффективными. Так, в лампах ЛДЦ, ЛЕЦ, ЛХЕ в качестве синей компоненты могут использоваться либо указанный в табл. 13.1 галофосфат марки ЛГ-3К (обладающий высокой стабильностью в процессе горения ламп), либо пирофосфат бария, активированный титаном, марки ЛФ-490-1 (световая отдача ламп мощностью 40 Вт на этом люминофоре равна 60 лм/Вт вместо 55 лм/Вт при использовании ЛГ-3К). Примерно те же результаты можно получить на смеси ФЛЦ-600-6200-2 (ТУ 6-09-4845-80) трех люминофоров: титанат-фосфат бария $2BaO \cdot TiO_2 \cdot P_2O_5 \cdot Ba_2 \cdot P_2O_7$; ортофосфат стронция и магния, активированный оловом, $Sr_a \cdot Mg_b \cdot Ca_c \cdot Ba_d (Na_{2e}) (PO_4)_2 — Sn_{0,04}$, где $a+b+c+d+2e=0{,}96$, и галофосфат кальция, активированный сурьмой и марганцем $(Ca_{0,985} \cdot Cd_{0,045})_{10} (PO_4)_2 \cdot (F_{0,9}Cl_{0,1}) — Sb_{0,04} \cdot Mn_{0,075}$. Наивысшая стабильность светового потока ламп имеет место при замене ЛГ-3К (или ЛФ-490-1) на вольфрамат магния марки Л29 ($MgWO_4$), выпускаемый по ТУ 6-09-2043-77.

Однако при такой замене одних люминофоров другими следует одновременно тщательно контролировать, не изменились ли при этом индексы цветопередачи. Так происходит, если в смесь для ламп ЛТБЦ в качестве красной компоненты ввести окись иттрия, активированную европием, Y_2O_3—Eu. Световые параметры таких ламп могут возрасти, но отдельные частные индексы цветопередачи существенно снижаются, что свидетельствует о недопустимости такой замены для ламп делюкс.

Люминофоры для ламп специального спектрального состава. Здесь прежде всего нужно указать на лампы ЛФ40 (люминесцентные, фотосинтетические). Они служат для облучения сельскохозяйственных растений в теплицах. Одна из разновидностей этих ламп изготавливается на люминофоре Л42ДН и, соответственно, имеет максимум излучения лишь в красной области спектра, две другие — на смеси Л42ДН и ЛГ-3К или Л42ДН и ЛФ-490-1. Спектр излучения таких ламп имеет два максимума — синий и

красный. Все эти лампы увеличивают съем плодов в сравнении с контрольными лампами ЛБ или ЛДЦ на 20—30%.

В лампах типа ЛФР150, имеющих мощность 150 Вт и предназначенных для облучения растений в вегетационных камерах и шкафах, применяются люминофоры с синим излучением (марки ЛР-1) и с красным излучением (марки К-77). При этом люминофор ЛР-1 используется для нанесения отражающего слоя, а более стабильный К-77 наносится поверх него.

Этот люминофор — окись иттрия, активированная европием, марки К-77 оказался полезным в лампах ЛФР150 по двум причинам: 1) он обеспечил высокую интенсивность излучения в красной области спектра; 2) обладая большой радиационной стойкостью, он позволил получить в высокоинтенсивной лампе стабильность светового потока значительно большую, чем у ламп с другими люминофорами (включая и ГФК).

Люминофоры для ламп «нового поколения». В последние годы появились сообщения о разработке и организации промышленного производства люминесцентных ламп, изготовляемых с применением тройной смеси люминофоров, подобных вышеупомянутой окиси иттрия, излучающих в узких полосах спектра. Эти источники света получили наименование ламп «нового поколения». Главные усилия разработчиков концентрируются на создании ламп с большими общими индексами цветопередачи ($R_a>80$) и высокой светоотдачей. За счет использования узкополосных редкоземельных люминофоров, отличающихся высокой ста-

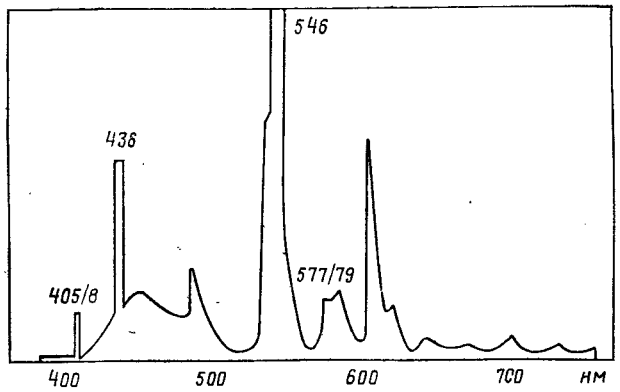


Рис. 13.2. Спектральная характеристика ламп «нового поколения»

бильностью светового потока, появилась возможность перейти к изготовлению ламп в трубках диаметром 26 мм. Световая отдача таких ламп может быть поднята до 100 лм/Вт вместо обычных 75—80 лм/Вт. Эти лампы к тому же потребляют меньше электроэнергии и менее материалоемки (энергоэкономичные лампы).

Упомянутые люминофоры обычно содержат редкоземельные элементы и поэтому очень дороги. Типичные составы люминофоров для ламп этого типа: хлорапатит кальция и стронция, активированный европием, $Sr_3 \cdot (PO_4)_2 \cdot CaCl_2$—Eu — люминесценция с максимумом излучения при длине волны $\lambda=450$ нм (синий цвет); алюминат магния, активированный церием и тербием $(CeTb) \cdot Mg \cdot Al_{11} \cdot O_{19}$ — люминесценция с максимумом излучения при $\lambda=540$ нм (зеленый цвет); упоминавшаяся ранее окись иттрия, активированная европием, Y_2O_3—Eu — люминесценция с максимумом излучения при $\lambda=610$ нм (красный цвет).

Типичная спектральная характеристика ламп с узкополосными люминофорами приведена на рис. 13.2.

Очень важен вопрос о возможной области применения ламп «нового поколения». Обращает на себя внимание то, что в литературе сообщается о высоких световых отдачах и больших общих индексах цветопередачи этих ламп. Однако почти нет данных о специальных индексах, характеризующих насыщенные цвета, цвет человеческой кожи, зеленого листа. В связи с этим трудно судить, в какой мере новые лампы конкурентоспособны по отношению к обычным лампам делюкс (супер делюкс, экстра делюкс). Возможно, что лампы «нового поколения» должны сменить не лампы делюкс, а стандартные лампы, благодаря чему без снижения световых потоков можно будет существенно улучшить цветопередачу при использовании любых люминесцентных ламп общего назначения. В этом случае классические лампы делюкс будут применяться лишь там, где оправданы потери в световом потоке ради создания особых условий по цветопередаче (текстильные фабрики, отдельные предприятия торговли, картинные галереи и др.).

Люминофор для эритемных ламп и ламп ультрафиолетового облучения. Излучение в области 300—310 нм, которое необходимо для эритемных ламп, обеспечивают люминофоры Э1, Э2 и Э3. Люминофор Э1 — фосфат кальция и цинка, активированный таллием, $(Ca, Zn)_3 \cdot (PO_4)_2$—Tl имеет максимум кривой излучения при $\lambda=312$ нм; люминофор Э2 — фосфат кальция, цинка и магния, активированный таллием, $(Ca, Zn, Mg)_3(PO_4)_2$—Tl — при $\lambda=305$ нм и Э3 — силикат бария и цинка, активированный свинцом, $BaZn_2Si_2O_7$—Pb — при $\lambda=300 \div 305$ нм.

В серии ламп ультрафиолетового облучения (ЛУФ) мощностью 4, 40, 80 Вт, как и в лампе ЛДЦУФ (см. табл. 13.1), используется люминофор Л33. Напомним, что лампы ЛУФ, строго говоря, уже не источники света, а источники излучения, и служат они не для освещения, а для облучения.

13.2. ВЛИЯНИЕ СЛОЯ ЛЮМИНОФОРА НА ПАРАМЕТРЫ ЛАМП

Связь параметров ламп с качеством слоя люминофора. Как уже было показано при расчете теплового режима колбы (§ 12.1) и предельной световой отдачи люминесцентной лампы (§ 13.1), слой люминофора существенно влияет и на световую отдачу, и на тепловой режим.

Не только световой поток, но и цветность ламп зависит от толщины слоя люминофора. При очень тонком слое на общей цветности лампы в большей мере будет сказываться частичное просвечивание сквозь слой люминофора излучения ртутного разряда (лампы будут более синими). Чем толще слой, тем больше действует он в качестве фильтра, задерживающего все большую часть светового потока лампы. Совокупность этих факторов приводит к тому, что при изготовлении ламп должна быть найдена какая-то оптимальная толщина слоя.

Толщину слоя правильнее всего определять удельной нагрузкой люминофора. Для этого с лампы счищают слой люминофора, взвешивают счищенный люминофор и делят массу на площадь поверхности трубки. При испытании каждой новой партии люминофора его наносят на группу трубок с заведомо разной толщиной слоя. С части трубок счищают люминофор и определяют удельную нагрузку, а из другой части делают лампы и измеряют их световой поток. После этого строят график зависимости световой отдачи от удельной нагрузки. В качестве заданной нагрузки для испытуемой партии люминофора берут ту, которая соответствует максимуму на графике. Все это приходится делать, так как у разных партий люминофора может быть разная оптимальная удельная нагрузка. Кроме того, она оказывается разной для разного типа ламп и тем более для разных типов люминофоров. Для галофосфатного люминофора ламп ЛБ оптимальная нагрузка находится в пределах 4—5 мг/см^2.

При заданной удельной нагрузке можно проверять толщину слоя люминофора экспресс-методом — по светопропусканию трубки с нанесенным слоем люминофора [10].

Одним из важнейших световых параметров ламп является стабильность светового потока. Даже когда лампа будет иметь максимально возможную световую отдачу, соответствующую предельной световой отдаче, рассчитанной в § 13.1, она может оказаться совершенно неприемлемой в эксплуатации, если ее световой поток будет нестабильным во времени. Стабильность же в решающей степени зависит от радиационной стойкости люминофора, который используется для создания люминофорного слоя лампы.

Кроме указанных выше факторов большое влияние на световые параметры ламп оказывает характер взаимодействия люминофорного слоя со стеклом и ртутью. Установлено, что диффузия ионов натрия из стекла в слой люминофора приводит к уменьшению яркости ламп.

Сорбционные свойства люминофорного слоя. Характер взаимодействия люминофора с ртутью еще полностью не выяснен, однако экспериментально установлено, что при работе лампы пары ртути в ней поглощаются (сорбируются). Этим и вызывается необходимость введения ртути в избытке в виде капли. Установлено также, что для разных люминофоров имеет место различная скорость поглощения ртути. Механизм этого явления пока еще не выяснен — то ли это сорбция ртути, то ли какое-либо химическое взаимодействие, то ли и то и другое. Очень важно, что, как оказалось, по мере улучшения качества люминофора (его структуры, яркости, световой отдачи ламп с этим люминофором) уменьшается способность его к поглощению ртути. Есть данные о том, что с поглощением ртути связана стабильность светового потока ламп. Некоторые авторы утверждают, например, что в процессе горения лампы слой люминофора частично покрывается пленкой из окислов ртути — это и приводит к снижению светового потока. С качеством слоя может быть связана и возможность проникновения ртути через пустоты в слое к стеклу с последующим взаимодействием ртути со стеклом.

Адгезия. С параметрами лампы связана и адгезия люминофора к стеклу трубки-колбы. Прежде всего при плохой адгезии люминофор отслаивается от стекла и в процессе изготовления, и при горении ламп. Это приводит к ухудшению внешнего вида ламп. Отслаивание (осыпание)

люминофора может повлиять и на световые параметры ламп. Проверка адгезии часто производится сдуванием люминофора струей сжатого воздуха (лучше — азота).

Меры по улучшению качества слоя люминофора, предпринимаемые при разработке и изготовлении ламп. Наряду с настойчивыми поисками путей усовершенствования люминофоров: повышения их квантового выхода, оптимизации гранулометрического состава, повышения стойкости к технологии изготовления ламп, радиационной стойкости для улучшения качества люминофорного слоя — необходимо тщательно контролировать поступающие партии люминофора на соответствие их нормативной документации; проверять стабильность люминофоров к технологии изготовления ламп (неизменность яркости при размоле, при термической обработке на воздухе и в вакууме); проверять радиационную стойкость люминофоров; проверять гранулометрический состав порошков люминофоров, добиваясь размолом, фракционированием получения оптимального состава для наилучшей упаковки слоя. Очень важно добиваться, чтобы в люминофоре не было чрезмерно мелких частиц (<1 мкм), увеличивающих коэффициент отражения слоя, а значит, приводящих к снижению $A_{уф}$. Чрезмерно крупные частицы не позволяют получить плотный и прочный слой люминофора на стекле. Поэтому необходим подбор условий размола люминофора. Для получения воспроизводимых цветностей ламп необходимо централизованное производство смесей люминофоров наряду с отдельными их компонентами, которые также могут потребоваться для корректировки цветности ламп в производстве. Необходимо точное выполнение заданных технологических режимов изготовления ламп и заданной конструкции в соответствии с утвержденной документацией. Для этого должна неизменно совершенствоваться техника контроля качества ламп и повышаться требовательность к технологии. Систематические работы по усовершенствованию технологии формирования и обработки слоя люминофора дают большой вклад в повышение световой отдачи ламп. Рассмотрим примеры таких работ на отдельных технологических операциях изготовления ламп.

Мойка трубок. Одной из элементарных мер вакуумной гигиены и культуры производства является тщательная мойка стеклянной посуды. В ламповом производстве речь идет о необходимости мойки трубок-колб, чему не всегда уделяется должное внимание. На машинах мойки трубок легко организовать обливание внешней поверхно-

сти трубок водным раствором фосфата аммония, приводящее к уменьшению брака по осыпанию люминофорного слоя. Внутреннюю поверхность трубок можно обливать и растворами для нанесения защитных пленок.

Изготовление люминофорной суспензии. Это одна из наиболее важных операций технологического процесса изготовления ламп, определяющая в значительной мере качество люминофорного слоя, а значит, и световую отдачу ламп. В ходе выполнения этой операции производится суспензирование порошка люминофора в лаке на смоле БМК, размол люминофора в шаровой мельнице и тщательное перемешивание компонент смеси люминофоров, если приходится применять набор люминофоров вместо готовой смеси (для ламп ЛДЦ, ЛЕЦ и др.).

Время размола подбирается опытным путем с использованием двух критериев: слой люминофора должен быть гладким, бархатистым, а с другой стороны, не следует допускать излишнего перемола, приводящего к снижению световой отдачи ламп (определяется путем изготовления ламп технологической пробы).

Отечественная технология приготовления суспензии предусматривает применение в качестве связующего (биндера) полимерной смолы на основе эфиров метакриловой кислоты (полибуталметакрилат) марки БМК5, хотя зарубежные фирмы все еще применяют нитроклетчатку. Сгорание метакриловых смол протекает в 2 стадии: 1) при 200—250 °С полимер разлагается на мономеры; 2) мономеры сгорают при более высокой температуре. Сгорание нитроклетчатки, наоборот, происходит в одну стадию с бурным выделением продуктов сгорания, разрыхляющих слой. На смоле БМК5 удается получить более плотные слои люминофора, используя при этом менее вязкий лак, с меньшим содержанием связующего, чем в нитролаке. При этом улучшается адгезия люминофора к стеклу, обеспечивается хорошее высыхание лака и лучший внешний вид слоя люминофора за счет малой пористости его. Все это приводит к улучшению световых и иных параметров ламп. Преимущества лака на смоле БМК5 (а значит, и недостатки нитролака) оказались столь значительными, что перевод производства ламп на этот лак дал возможность освоения люминофоров с улучшенной гранулометрией. Нитролак был приемлем при старых люминофорах (Л34 и др.), рассчитанных на длительный размол, при котором образовывалось много мелких частиц, улучшавших адгезию, но снижавших световую отдачу. Применение усовершенствованных люминофоров (ЛГ-1-2, ФЛ-580-3500), позволивших за счет малого времени размола существенно повысить световую отдачу ламп, было бы невозможно с нитролаком из-за осыпания люминофорного слоя. Внедрение лака на смоле БМК5 решило эту проблему.

Приведенный пример наглядно иллюстрирует, сколь эффективным может быть усовершенствование этой операции. Наиболее актуальной в области изготовления люминофорной суспензии является теперь задача механизации этой операции, при осуществлении которой затрачивается много тяжелого ручного труда. Имеются данные, позволяющие считать, что внедрение ультразвукового размола люминофора может и облегчить механизацию этой операции, и улучшить параметры ламп.

В настоящее время люминофорная суспензия (на нитролаке или на смоле БМК) изготавливается с использованием бутилацетата — легко воспламеняющейся жидкости. Работы Полтавского завода газоразрядных ламп (ПЗГРЛ) по внедрению суспензии с водорастворимыми связующими (например, с поливиниловым спиртом) не только устраняют применение пожароопасного бутилацетата, но и способствуют (по данным разработчиков) улучшению параметров люминесцентных ламп (в частности, стабильности светового потока).

При нанесении люминофорного слоя наблюдается значительное расхождение в толщине слоя по длине трубки (до 20%). Если считать, что оптимальная толщина слоя подобрана для середины трубки, то за счет стекания суспензии во время сушки слоя на верхнем конце толщина будет ниже оптимальной примерно на 10%, а на нижнем — выше оптимальной примерно на 10%. Это тоже один из резервов улучшения параметров ламп. В этой связи заслуживают большого внимания работы ПЗГРЛ по регулированию температуры, влажности и темпа подъема суспензии на водорастворимом связующем. Легко видеть, что эта прогрессивная технология целесообразна и при любом составе суспензии (в том числе суспензии на БМК с бутилацетатом).

Выжигание биндера. Некоторые типы люминофоров не выдерживают высоких температур (550 °С), необходимых для надежного выжигания биндера (нитроклетчатки, полимерной смолы БМК5 или водорастворимых полимеров) за короткое время, которое удается отводить на эту операцию при больших производительностях сборочных ли-

ний. Так обстоит дело с люминофором Л42ДН, применяемым при изготовлении ламп ЛДЦ, ЛЕЦ, ЛХЕ. Положение усложняется тем, что при изготовлении этих ламп используются смеси люминофоров и понижение температуры, необходимое для одного люминофора, оказывается недопустимым для другого. Нужно искать или возможностей повышения термостойкости отдельных люминофоров, или иных технологических решений по нанесению люминофорных слоев (раздельный размол компонент смеси и др.). При этом не следует забывать экономическую сторону проблемы. Ведь при разработке ламп, люминофоров, их технологии нужно обеспечивать качественную, количественную и экономическую оценки проводимых мероприятий.

Заварка и откачка ламп. Необходимо так совершенствовать технологию заварки и откачки ламп, чтобы высокие температуры газовых горелок не приводили к ухудшению слоя люминофора вообще, а в местах заварки в особенности; обработка катодов на откачном автомате не должна приводить к распылению катодов и оседанию продуктов распыления на люминофоре как в зоне катодов, так и по всей поверхности люминофора, чтобы не было введено слишком мало ртути (аргона), и слишком много, чтобы слой люминофора не был «сбит» при введении в лампы аргона (или смеси газов).

13.3. ГАЗОВОЕ НАПОЛНЕНИЕ

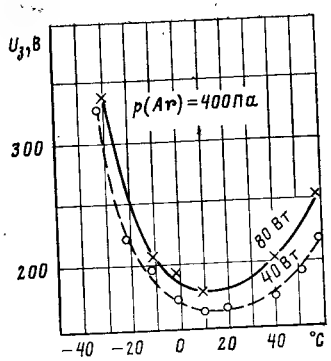
Роль паров ртути. Как уже было сказано в § 11.1, в современных люминесцентных лампах пары ртути являются основным рабочим веществом, обеспечивающим высокую эффективность ламп.

Рассмотрим несколько подробнее вопрос о том, каковы особенности, определяющие роль ртути в лампе. Представим себе прежде всего, что давление паров ртути по какой-либо причине окажется ниже оптимального. Такой причиной может быть уменьшение температуры стенки лампы за счет снижения температуры окружающей лампу среды. Известно, что при низких температурах (особенно ниже 0 °С) лампы плохо зажигаются и тускло горят. Зависимость напряжения зажигания ламп от температуры показана на рис. 13.3.

Повышение напряжения зажигания ламп при малых температурах происходит потому, что при этом частично вымораживаются пары ртути, концентрация ее паров уменьшается и ионизируются в значительной степени ато-

мы инертного газа (аргона или смеси газов), имеющие, однако, более высокие потенциалы ионизации. В этом случае исчезает положительное действие эффекта Пеннинга, состоящего в снижении напряжения зажигания разряда в неоне или аргоне при добавлении к нему паров ртути.

Как видно из рис. 13.3, напряжение зажигания растет и при повышении температуры (в закрытых светильниках, в горячих цехах и т. д.). Причина состоит в повышении концентрации паров ртути — для их ионизации требуется затрата большей энергии, что приводит к возрастанию напряжения зажигания ламп.



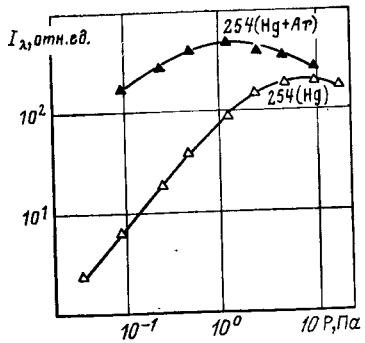


Рис. 13.3. Зависимость напряжения зажигания ламп от температуры окружающей среды

Рис. 13.4. Зависимость интенсивности излучения линии 254 нм от давления паров ртути и добавки к ним аргона

Такой же результат, как и при низкой температуре окружающей среды, получается при комнатной температуре, если в лампу введено так мало ртути, что давление паров не достигает давления насыщения, или вместо ртути введена ее амальгама (в этом последнем случае давление паров при комнатной температуре будет существенно ниже 0,8 Па).

При использовании амальгам такое давление достигается при более высоких температурах, что и желательно при работе ламп в условиях, когда эти температуры имеют место. Чтобы исключить вид брака «мало ртути» в лампах со ртутью, последняя вводится с избытком (в виде капли). Это необходимо и потому, что в ходе эксплуатации лампы ртуть поглощается люминофором, стеклом и другими деталями лампы. Однако чрезмерно много ртути

вводить нельзя, поскольку это отрицательно сказывается на внешнем виде ламп (ртуть оседает черным налетом на стенках; за счет этого может, кроме того, нарушиться целостность слоя люминофора — люминофор отстает кусками или образуется мелкая сетка просветов).

Назначение инертных газов в ртутных лампах. Ранее уже отмечалось, что вводимый в лампу инертный газ увеличивает ее срок службы за счет снижения температуры катодного пятна и анодно-катодного падения потенциала. Оказалось, что его введение приводит, кроме того, к существенному увеличению выхода резонансного излучения атомов ртути и делает лампу еще более эффективной. В. А. Фабрикантом и Ф. А. Бутаевой [16] это объяснено при учете роли вторичных процессов, происходящих в разряде. Дело в том, что значительная часть (до 2/3) атомов ртути в разряде низкого давления оказывается в метастабильном состоянии (в состоянии $^3P_0$ с потенциалом возбуждения 4,7 В и $^3P_2$ с потенциалом возбуждения 5,5 В). Метастабильные атомы — это атомы, возбужденные до уровней, с которых излучающие переходы маловероятны. В процессе горения разряда атомы ртути, в том числе и метастабильные, диффундируют (перемещаются) к стенке лампы и их энергия постепенно превращается в теплоту. При введении в ртутный разряд инертных газов давление в лампе возрастает в сотни раз, а значит, уменьшается и скорость перемещения метастабильных атомов к стенке. Столь же значительно возрастает и вероятность их столкновения с электронами. Столкновения переводят атомы из метастабильных в излучающее состояние $^3P_1$ с потенциалом возбуждения около 4,9 В. Для этого электрон должен добавить энергию атому, находящемуся в состоянии $^3P_0$, или отнять часть энергии у атома на уровне $^3P_2$. В итоге значительная доля энергии метастабильных атомов ртути переходит не в теплоту, а в излучение. Этим и определяется повышение светового потока ртутно-аргоновых ламп в сравнении с чисто ртутными. Увеличение интенсивности излучения линии 254 нм отчетливо видно на рис. 13.4.

Большое значение инертных газов состоит в том, что их использование вместе с парами ртути позволяет, как было отмечено выше, реализовать эффект Пеннинга для поддержания заданного напряжения зажигания ламп.

Вопросы выбора давления наполняющего лампы газа наиболее полно и исчерпывающе изучены в работах И. М. Весельницкого [18], пришедшего к выводу о том, что оптимальное давление аргона с точки зрения выхода

резонансного излучения должно быть значительно более низким, чем обычно принятое. Для лампы мощностью 40 Вт оно должно быть близким к 60 Па, а для лампы мощностью 250 Вт, длиной 1,5 м — 9 Па. Такие малые давления выгодны потому, что они позволяют повысить энергию хаотичного движения электронов и увеличить тем самым вероятность возбуждения атомов ртути. С другой стороны, за счет этого более активно идет процесс износа катодов, а значит снижается срок службы ламп. Приходится изыскивать способы защиты катодов введением, в частности, экранов или поиском иных эмиттеров. Изучается и возможность замены спиральных катодов прессованными (спеченными) катодами.

В лампах массового выпуска (от 15 до 80 Вт) с обычной удельной электрической нагрузкой давление аргона находится в настоящее время на уровне 330 Па вместо первоначальных (в процессе разработки ламп) 530 Па. Ниже 330 Па ни в СССР, ни за рубежом в таких лампах, как правило, не спускаются, так как большие сроки службы (10—15 тыс. ч) при малых давлениях осуществлять не удается. Кроме того, при малых давлениях, как установлено, снижается стабильность светового потока ламп.

Повышение энергии электронов и ионов можно осуществить не только за счет понижения давления аргона, но и за счет применения смеси газов. Наиболее широко распространены смеси Ar (80—90%) и Ne (20—10%). Для каждого типа ламп по мощности необходимо подбирать свою оптимальную смесь и свое оптимальное давление. Как видно из проведенного рассмотрения, оптимум должен выбираться не только по условию получения наибольшего выхода резонансного излучения, но и с учетом возможных сроков службы и стабильности светового потока.

Инертные газы в безртутных лампах. В 1935 г. Дженкинсом (Англия) была запатентована люминесцентная лампа, основным рабочим веществом которой стал инертный газ (неон), а не ртуть. Лампа давала небольшой световой поток. Она оказалась практически не белой (хотя при изготовлении использовались синие и зеленые люминофоры), а розовой. По этим причинам такие лампы не получили распространения.

Малый световой поток ламп Дженкинса не случаен. Он объясняется тем, что на образование одной порции световой энергии (кванта света) в лампах с инертными газами затрачивается значительно больше энергии, т. е. квант возбуждения с большой энергией (высокоэнергети-

ческий квант), а в ртутных лампах — с малой (малоэнергетический квант). Так происходит потому, что энергия кванта обратно пропорциональна длине волны излучения. У ртути она равна, как было сказано выше, 253,7 нм, а у неона 73,6—74,4 нм, т. е. квант неона обладает в 3—4 раза большей энергией, чем квант ртути. Однако оказалось, что такая принципиальная особенность ламп Дженкинса может быть использована и как существенное преимущество, позволяющее компенсировать их недостаток. Это может быть осуществлено, если воспользоваться предложенным В. А. Фабрикантом еще в 1945 г. [17] обменом одного кванта возбуждающего излучения не на один, как это ранее считалось неизбежным для оптической области спектра, а на два или более. Осуществить такой обмен по ряду причин оказалось трудно. Он, в частности, был реализован в работах Ч. Б. Лущика [19] и его школы с щелочно-галоидными люминофорами. В этом случае имеет место не обычная передача энергии возбуждения активаторам (или сенсибилизаторам), а возбуждается сама кристаллическая решетка люминофора. При этом один квант возбуждающего излучения создает две или более электронно-дырочные пары, которые потом превращаются в два или более кванта рекомбинационного свечения. Это явление получило название фотонного умножения. Было установлено, что энергии кванта резонансного излучения ртутного разряда с $\lambda = 254$ нм, равной примерно 4,9 эВ (1 эВ $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж), не хватает для такого рода возбуждения решетки, тогда как для высокоэнергетических квантов неонового разряда (16,7 эВ) и гелиевого разряда (21,4 эВ) это принципиально осуществимо. (В дальнейшем удалось найти и подходящие для этой цели люминофоры.) В частности, Э. Р. Ильмасом, Ч. Б. Лущиком и В. В. Федоровым было предложено использование в безртутных лампах окиси иттрия, активированной европием.

Итак, если в ртутных лампах инертный газ является вспомогательным газом, в безртутных лампах (подробнее о них см. в гл. 14) он становится основным рабочим веществом. При этом выявляются и их положительные особенности (отсутствие токсичности, независимость параметров лампы от температуры окружающей среды; возможность осуществления явления фотонного умножения) и отрицательные (малое квантовое отношение, низкий выход резонансного излучения, необходимость использования очень малых давлений для повышения его выхода, высокие градиент потенциала и анодно-катодные потери и,

как следствие, снижение световой отдачи и низкий срок службы ламп).

13.4. КОНСТРУКЦИЯ ЦОКОЛЕЙ

Конструкция цоколя. Цоколи массовых люминесцентных ламп стартерного зажигания и быстрого пуска должны обеспечивать: 1) надежный электрический контакт лампы с патронами (ламподержателями) светильников в течение всего срока службы; 2) возможность осуществления подогрева катодов в пусковом режиме лампы. Эти требования определяют принятую конструкцию цоколя,

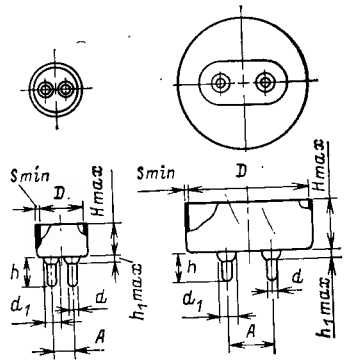


Рис. 13.5. Цоколи малогабаритных и стандартных ламп

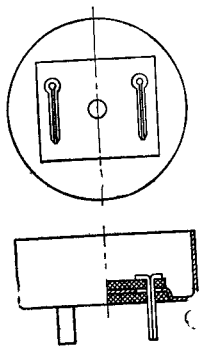


Рис. 13.6. Ножевой цоколь

регламентированную ГОСТ 17100-79 и изображенную на рис. 13.5. Здесь слева показан цоколь малогабаритных ламп (4—13 Вт) типа G5d/15, а справа цоколь для ламп 15—80 Вт (15 и 30 Вт в трубке диаметром 25 мм; 20, 40, 65 и 80 Вт в трубке диаметром 38 мм) типов G13d/24 и G13d/35.

Как видно из рисунка, цоколь состоит из металлического (алюминиевого) стаканчика, гетинаксовой изолирующей прокладки и двух штырьков. Для обеспечения надежного контакта между штырьками цоколя и электродами (выводами) лампы последние продеваются сквозь полые штырьки и припаиваются или привариваются к ним. Гетинаксовая прокладка изолирует штырьки между собой и предотвращает возможность электрического пробоя от штырька на стаканчик цоколя. При поставках ламп на экспорт и в страны с тропическим климатом используется не алюминиевый, а латунный никелированный

стаканчик и стеклотекстолитовая прокладка вместо гетинаксовой.

В табл. 13.2 приведены размеры цоколей (ГОСТ 17100-79), изображенных на рис. 13.5.

Таблица 13.2

Обозначение размеров	Размеры, мм, цоколей типа					
	G5d/15		G13d/24		G13d/35	
	Номинальный	Допуск	Номинальный	Допуск	Номинальный	Допуск
A	4,75	±0,15	12,70	±0,20	12,70	±0,20
D^*	15,00	∓0,30	23,50	∓0,30	34,50	∓0,30
H_{max}	12,00	—	14,00	—	14,00	—
d	2,44	—0,15	2,44	—0,15	2,44	—0,15
d_1	3,30	—0,30	3,30	—0,30	3,30	—0,30
h	7,30	—0,70	7,30	—0,70	7,30	—0,70
h_{1max}	1,27	—	1,27	—	1,27	—
S_{min}	0,17	—	0,17	—	0,17	—

Цоколи малогабаритных ламп (мощностью 4—13 Вт), выпускаемых на отечественных заводах, могут быть не штырьковыми, а штифтовыми (G15s/12), однако и эти цоколи должны обеспечивать прогрев катодов в стартерных схемах до зажигания ламп за счет прохождения тока по катодам. Высота таких цоколей 15 мм, их диаметр — 12 мм.

На рис. 13.6 изображен цоколь высокоинтенсивной люминесцентной лампы (типа ЛФР150, ЛХБ150). Несимметричная конструкция анодно-катодного узла и большой рабочий ток (1,9 А) привели к необходимости замены штырьковых цоколей ножевыми. В остальном конструкция цоколя остается прежней.

Крепление цоколей. Для того чтобы при правильной конструкции цоколь мог удовлетворительно выполнять свои функции надежного обеспечения контакта лампы с ламподержателями, необходимо соблюдение известных правил цоколевания ламп. Прежде всего должна быть обеспечена надежность крепления цоколя к лампе, правильная посадка цоколя: оси цоколей и лампы должны совпадать; все четыре штырька двух цоколей должны лежать в одной плоскости, чтобы можно было обеспечить правильное введение их в прорези ламподержателей. Правильность посадки цоколя проверяется в сборочном цехе визуально, а надежность крепления — по скручивающему моменту. Лежат ли штырьки в одной плоскости,

определяют, помещая лампу в специальный калибр. Штырьки не должны качаться, чтобы поддерживалась заданная жесткость системы, без чего не может быть должной надежности электрического контакта. Не должно быть трещин в гетинаксе. Гетинаксовая прокладка должна быть прочно заштампована.

Цоколевочная мастика. Выдержит или не выдержит лампа проверку на скручивание, зависит от того, как проведена операция цоколевания, но в первую очередь от качества цоколевочной мастики.

В состав применяемой в производстве ламп цоколевочной мастики входят мраморная пудра, канифоль, уротропин, малахитовый зеленый. Все это размешивается вместе с формальдегидным лаком и этиловым спиртом в механической мешалке.

Образовавшаяся зеленая мастика (за счет малахитового зеленого) намазывается на внутренний край стаканчика цоколя. Намазанные цоколи надеваются на лампу (при этом выводы лампы продеваются в штырьки), и на горизонтальной машине производится цоколевание при прохождении цоколей в газовых фигурных печах. Высокая температура печи приводит к полимеризации мастики. При этом мастика затвердевает и прочно прикрепляет цоколь к лампе. Свидетельством удовлетворительного проведения операции полимеризации может служить изменение цвета мастики с зеленого на соломенно-желтый за счет выгорания малахитового зеленого.

Неустанно ведутся поиски иных, более высокотемпературных рецептур мастики, способных обеспечить повышенную прочность скрепления цоколей с лампой при повышенных температурах окружающей лампу среды (до 100 °С) и высокой степени влажности.

13.5. ТОКОПРОВОДЯЩЕЕ ПОКРЫТИЕ

Роль токопроводящего покрытия. Как уже отмечалось в § 11.2, при изготовлении ламп для бесстартерных схем зажигания — ламп быстрого пуска (БП) — на трубки-колбы наносится токопроводящее покрытие — токопроводящая полоса. За счет нанесения такого покрытия снижается напряжение зажигания одноэлектродного разряда и облегчается электрический пробой газового промежутка между противоположными электродами. Если у ламп без полосы напряжение пробоя зависит от электропроводности поверхности стекла и поэтому очень критично к влажности и температуре окружающего воздуха, то у

ламп с токопроводящей полосой эта зависимость существенно ослабляется. Поэтому лампы с токопроводящей полосой (или сплошным токопроводящим покрытием) используются, в частности, там, где требуется гарантировать их зажигание в широком диапазоне изменения условий окружающей среды. Положительно сказывается на зажигании ламп заземление полосы или соединение ее с одним из электродов (по соображениям техники безопасности в цепь такого соединения включается сопротивление порядка 300 кОм). Напряжение зажигания ламп с подогревными катодами и заземленными (или подключенными к одному электроду) токопроводящими полосами удается снизить до 130—150 В.

К числу имеющихся бесстартерных ламп в СССР следует отнести высокоинтенсивные лампы ЛФР150. Саранское производственное объединение «Светотехника» выпускает цветные и малогабаритные лампы быстрого пуска. В связи с этим при рассмотрении способов нанесения токопроводящих покрытий представляется необходимым более детально ознакомиться с тем, как были решены эти вопросы.

Способы нанесения токопроводящих покрытий. Сплошное токопроводящее покрытие может быть нанесено при вытягивании стеклотрубок. Для этого раствор хлористого олова наносится пульверизатором на горячую трубку (400—500 °С), выходящую из печи. Однако прозрачная проводящая пленка из окислов олова с примесью элементарного олова, образующаяся на поверхности стекла, на операции заварки ножек разрушается в месте заварки. При этом нарушается электрический контакт пленки с корпусом цоколя, надеваемого на лампу, что усложняет проблему заземления или подключения пленки к одному из электродов. Из-за большой электрической емкости такой пленки на ней может образовываться высокий электрический потенциал и возникать опасность легкого поражения током при прикосновении человека к горящей лампе.

Значительно более безопасна узкая (1—2 мм) полоса из листового металла (фольги), наклеенная на лампу после цоколевания и припаянная или приваренная к корпусам цоколей. Для наклейки такой полосы из никелевой плющеной проволоки на МЭЛЗ была сконструирована специальная машина. Недостаток технологии приклеивания — отсутствие гарантии прочного закрепления полосы: Его можно устранить при использовании точечной сварки.

Однако сварка полосы с корпусом цоколя легко осуществляется пока только при стальном корпусе, в то время как в ламповом производстве теперь применяются алюминиевые цоколи. Другим недостатком машины наклеивания полосы являются ее большие габариты. И хуже всего то, что она обладает очень низкой производительностью (около 100 шт./час).

Более технологичен процесс нанесения на цоколеванную лампу полосы токопроводящей эмали, например эмали АС-538, содержащей в себе порошок карбонильного никеля и смолу БМК5. Эмаль готовится в виде жидкой пасты и наносится на лампу через отверстие в дне бачка, движущегося вдоль лампы. Начальное сопротивление полосы — несколько сотен ом при длине ламп 1,5 м. По мере горения лампы оно значительно возрастает и доходит до десятков килоом. Однако на параметрах ламп, включая их зажигание, увеличение сопротивления не сказывается. В связи с этим эмаль следует считать приемлемой для нанесения полосы на стандартные лампы (до 65—80 Вт). На СПО «Светотехника» создана машина нанесения токопроводящих покрытий на трубки малогабаритных ламп.

Глава четырнадцатая

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

14.1. ЛАМПЫ С АМАЛЬГАМОЙ

Специальные люминесцентные лампы. Наиболее характерные примеры ламп специального назначения — амальгамные лампы для работы при повышенной температуре, люминесцентные фигурные лампы, сигнальные, эритемные, цветные лампы. Общее число отечественных люминесцентных ламп, упоминаемых в каталоге на газоразрядные лампы, вместе с лампами, входящими в ГОСТ, с сигнальными лампами тлеющего разряда превышает 150 типоразмеров. Настоящая глава посвящена наиболее важным специальным люминесцентным лампам.

Положительные особенности ламп с амальгамами. Главной положительной особенностью ламп с амальгамами является отмечавшееся в предыдущих главах смещение максимума световой отдачи на кривой ее зависимости от температуры окружающей среды в сторону больших температур — к 40—70 °С вместо 20 °С при использовании жидкой ртути. В то же время у этих ламп есть еще одно

свойство, неоценимое для изготовителей ламп: при производстве этих ламп в сборочных цехах получается значительно меньшая концентрация паров ртути. Определяется это все той же особенностью амальгам, давление паров над которыми ниже, чем над ртутью, при равных температурах окружающей среды. Это свойство ламп с амальгамами дает возможность поддерживать концентрацию паров ртути в помещениях в норме, что исключительно важно по соображениям техники безопасности.

Есть данные о том, что замена ртути амальгамами приводит к почти двукратному уменьшению расхода ртути.

Типы амальгам. Фирмой «Осрам» (ФРГ) были разработаны лампы с амальгамой кадмия. Однако эта амальгама оказалась недостаточно стабильной в процессе эксплуатации ламп из-за летучести Cd. Кроме того, лампы с такой амальгамой имели узкий диапазон температур, в котором световой поток остается на достаточно высоком уровне. Значительно эффективнее оказалась амальгама индия In. К ее недостаткам относятся низкая температура плавления и трудности с формированием твердых кусков амальгамы (шариков, отрезков проволоки), применение которых облегчает механизацию введения амальгамы в лампы. Более приемлемыми оказались многокомпонентные амальгамы (до 3—4 металлов в одной амальгаме). По этому пути пошли и при разработке отечественных амальгамных ламп.

Современные многокомпонентные амальгамы имеют в своем составе Cd (или In). Температурный максимум у них всегда ниже, чем у бинарной системы Cd—Hg (80 и 20% соответственно), у которой он достигал 70 °C, если считать по температуре окружающей среды, или 90 °C, если принимать во внимание температуру стенок трубки.

Многокомпонентные амальгамы обладают высокими термодинамическими и механическими свойствами и содержат меньший процент токсичного вещества — ртути. Так, амальгама, применяемая СКТБ Полтавского завода газоразрядных ламп, с составом Hg—20%, Bi—5%, Pb—75% легко поддается штамповке, галтовке, не плавится при заварке ламп в процессе откачки.

Конструктивные особенности ламп с амальгамами определяются способом размещения амальгамы в лампе. Первоначально амальгама наносилась на внутреннюю поверхность трубки в виде узкой полосы. Размещалась она в середине лампы. Постепенно убедились в том, что такой способ введения амальгам неудовлетворителен, так как

при этом лампа характеризовалась большим временем разгорания (временем, в течение которого достигается нормальная яркость свечения). Это происходит потому, что ртуть из амальгамы испаряется очень медленно и давление паров даже при повышенных температурах доходит до насыщения в течение 15 и более минут. Малое начальное давление паров ртути может приводить и к трудностям с зажиганием ламп.

Тогда амальгаму стали помещать ближе к катоду для повышения ее температуры и ускорения процесса испарения. В другом варианте применяется разделение амальгамы. Меньшая часть ее помещается непосредственно у катода (на лопатке ножки, например)—это амальгама поджига, рассчитанная на достижение максимального сокращения времени разгорания. Другая, бóльшая часть располагается в более холодной зоне и обеспечивает давление ртути в рабочий период горения лампы.

Один из распространенных примеров размещения амальгамы — введение ее в штенгель. При этом принимаются меры к тому, чтобы она не проскакивала в лампу и не испарялась в процессе отпаивания штенгеля. Шарообразное утолщение в штенгеле для размещения амальгамы в отечественной лампе мощностью 125 Вт мы видели на рис. 12.6,*д*.

В прямой связи с размещением амальгамы находится вопрос о выборе формы ее заготовок. В специальном конструкторско-технологическом бюро источников света г. Полтавы разработан следующий процесс производства амальгам для размещения их в штенгеле: подготовка исходных компонент для плавки; загрузка и откачка ампул; плавка амальгамы и получение слитков; выдавливание проволоки: резка проволоки на штабики; штамповка шариков; галтовка шариков (диаметр шариков 2 мм); очистка шариков и контроль. Этот технологический процесс представляется достаточно прогрессивным.

Параметры амальгамных ламп. Амальгамные лампы по своим параметрам мало отличаются от ламп с ртутью. Так, световой поток и его стабильность — важнейшие параметры люминесцентных ламп — близки к соответствующим параметрам стандартных ламп (световые потоки их ниже на 3—5%, на доли процента больше спад светового потока к 40% срока службы). Менее благополучно обстоит дело с разгоранием. Оно достигает 15—20 мин, бывают случаи более долгого разгорания, особенно при неправильном использовании ламп в помещениях с пони-

женной температурой. Это приводит к рекламациям при использовании ламп у потребителей.

14.2. ФИГУРНЫЕ ЛАМПЫ

Фигурные лампы имеют то неоспоримое конструктивное преимущество, что их длина в 2—3 раза меньше, чем прямых ламп той же мощности. Они удобны поэтому для конструирования разнообразных по форме светильников, особенно для применения их в быту.

Конструктивной особенностью непрямых ламп является увеличение толщины стенок трубок-колб, что необходимо в связи с утоньшением стенок, происходящим в процессе их изгибания. Это приводит к повышенному расходу стекла.

U-образные лампы. До операции заварки включительно весь технологический процесс изготовления ламп идентичен процессу для обычных ламп, поэтому эта часть технологии не требует внесения конструктивных изменений в лампу (кроме толщины стенок). Такие изменения вводятся лишь операцией изгибания заваренных ламп. На откачной автомат лампы попадают уже конструктивно видоизмененными — U-образными. На операции цоколевания ламп оба цоколя лампы соединяются пластмассовой или металлической перемычкой [обечайкой]. Она обеспечивает необходимую жесткость конструкции U-образной лампы. Изгибание трубки приводит к небольшому уменьшению светового потока по сравнению со световым потоком прямой лампы за счет взаимного экранирования ветвей лампы.

W-образные лампы. К ним относится все сказанное об U-образных лампах. Потери в световом потоке у них несколько выше по той же причине. Они сложней в технологическом отношении.

Кольцевые лампы. Наиболее важной положительной особенностью этих ламп является возможность применения в одном светильнике набора кольцевых ламп, вставляемых одна в другую. Для этого используются лампы разной мощности и разной длины, а значит, и с разным диаметром кольца. В СССР выпускаются лампы ЛБК мощностью 22, 30 и 40 Вт, с диаметром кольца 216, 290 и 412 мм соответственно.

Кольцеобразная форма ламп влечет за собой появление других конструктивных особенностей. Прежде всего — диаметр трубок у них уменьшен до 30 мм. Для облегчения изгибания трубки изготавливаются из свинцового стекла. В торец лампы с бесштенгельной ножкой вваривается фуродитовое кольцо (кольцо из высокохромистой стали), за которое захватывается трубка при формировании лампы (коэффициенты расширения фуродита и свинцового стекла близки). Вместо вваривания фуродитовых колец можно формовать в торце лампы выступы или канавки в стекле. На стороне, противоположной от фуродитового кольца, имеется штенгель сложного профиля для введения его в зажимное гнездо откачного автомата. Все это делает конструкцию ламп пригодной для изгибания на гибочно-откачном автомате (или на специальном гибочном устройстве с откачкой на откачном

посту). На изогнутых и сближенных между собой концах откачанной лампы закрепляется четырехштырьковый цоколь, замыкающий собой кольцевую лампу. Для включения в сеть применяется патрон, рассчитанный на четырехштырьковый цоколь.

Световой поток кольцевых ламп находится на уровне 80—85% светового потока стандартных ламп той же мощности, а срок службы почти вдвое ниже (~62%).

Панельные лампы. Если U-образные и W-образные лампы делаются из согнутых трубок, то панельная лампа, имеющая аналогичную форму, часто наиболее близкую к форме W-образной лампы, конструктивно осуществляется совершенно иначе. Для ее изготовления берется листовое (электровакуумное) стекло, в нем формуются вмятины, в простейшем случае повторяющие форму W-образной лампы. Эта отформованная часть лампы накрывается плоским листом стекла и сваривается по рантам так, чтобы в соответствующих местах были выведены электроды лампы и штенгель для ее откачки. Для обеспечения оптимальных параметров профиль газоразрядного канала иногда усложняется, делается, например, трапецеидальным. Имеются публикации, в которых сообщается, что формуемая часть лампы изготавливалась не из плоского стекла, а из металлической жести с коэффициентом расширения, близким к коэффициенту расширения стекла.

14.3. ЛАМПЫ НЕКРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Желобковые и винтообразные лампы. Одним из способов обеспечения пониженной температуры стенок высокоинтенсивных ламп при одновременном повышении электронной температуры разряда является использование трубок некруглого сечения. Форма трубки желобковой лампы изображена на рис. 14.1. Здесь показан вариант, когда «желобки» и «вмятины» чередуются — один сверху, другой снизу. Они могут быть сделаны с одной стороны. Промежутки круглого сечения между вмятинами обеспечивают необходимую прочность системы. При несимметричном расположении вмятин разряд может «прижиматься» к одной из сторон, что нежелательно. Глубина вмятин также играет роль. Если она чрезмерно велика, канал разряда становится слишком узким, при этом растет напряжение зажигания и наблюдается неустойчивость горения разряда. В таких лампах холодными зонами являются участки, наиболее удаленные от оси разряда. В холодных зонах в несколько раз ниже яркость свечения по сравнению с желобковыми зонами.

Рис. 14.1. Форма трубки желобковой лампы

Вмятины могут иметь винтообразный характер. Такая лампа и называется винтообразной. Для желобковых и винтообразных ламп

характерна бо́льшая начальная свето́вая о́тдача в сра́внении с аналогичными лампами круглого сечения за счет бо́льшей длины положительного столба разряда, горящего не просто вдоль оси лампы, а обтекающего вмятины. Сужение диаметра трубки в районах вмятин приводит к снижению стабильности светового потока ламп в процессе их горения (это имеет место и в лампах круглого сечения при уменьшении диаметра колбы). В итоге общая эффективность желобковых ламп по оценкам, приведенным в [3], оказывается примерно той же, что и эффективность ламп круглого сечения. Поэтому такие лампы не нашли широкого распространения. Некоторые типы желобковых ламп изготавливались и в СССР; организовать же крупносерийное производство ламп не удалось из-за трудностей, встретившихся при конструировании и изготовлении машин формовки желобковых трубок.

14.4. ЦВЕТНЫЕ ЛАМПЫ

Цветные люминесцентные лампы применяются для декоративного освещения, используются для рекламы. В СССР выпускаются только лампы мощностью 40 Вт. Изготавливаются в тех же габаритах и с теми же электрическими параметрами, что и у стандартных ламп. В этом отношении наиболее близкой к стандартным по конструкции является зеленая люминесцентная лампа. Единственным ее отличием является замена люминофора: вместо белого ГФК здесь используется упоминавшийся в табл. 13.1 виллемит с максимумом излучения в зеленой области спектра (λ=525 нм).

Остальные цветные лампы: красные, желтые, голубые — изготавливаются иначе. В них на наружную поверхность готовых ламп с ГФК наносится слой цветного пигмента, который и определяет цвет лампы. Пигмент в виде суспензии наносится методом окунания так, чтобы суспензия не попадала на цоколи (для этого на них надеваются резиновые наконечники). Суспензия изготавливается из пигмента (суховальцованная паста по МРТУ 1.3-206-64) и лака АК113 (по МРТУ 6-6-10-473-64). Световой поток красных ламп — 330, желтых — 1460, розовых — 560, зеленых — 2100 и голубых — 1000 лм.

Неоновые сигнальные огни. В качестве аэродромных огней используются упоминавшиеся в § 11.1 красные неоновые дуговые лампы ДНеСГ 500-1. На их стенки не наносят люминофора, а лампы не являются, таким образом, люминесцентными. Они имеют мощность 485 Вт, рабочий ток — 6,5 А, световой поток — 6500 лм. Лампы надежно работают при температуре от минус 40 до плюс 40 °С, поскольку не содержат в себе ни ртути, ни ее паров.

14.5. ЛАМПЫ НАПРАВЛЕННОГО СВЕТОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Характерной особенностью ламп направленного светораспределения является нанесение на часть трубки (до 2/3 ее окружности) довольно толстого диффузио отражающего слоя из белого порошка с высоким коэффициентом отражения (например, окиси цинка или окиси титана). Поверх этого слоя наносится слой люминофора. Отражающий слой значительно (до 80%) увеличивает силу света лампы в направлении той части колбы, где нет этого слоя. С другой стороны, толстый отражающий слой поглощает часть светового потока лампы, и интегральный световой поток (суммарный поток по всем направлениям) снижается на 20—30%. Однако для ряда применений ламп выгоднее немного потерять в общем световом потоке, но значительно выиграть в силе света в нужном направлении (например, в случае использования настольных светильников с люминесцентными лампами или в лампах для светокопировальных аппаратов).

Слой люминофора наносится либо на всю внутреннюю поверхность трубки (рефлекторные лампы), либо так, чтобы щель не была покрыта люминофором (щелевые лампы). Таким образом, оба типа ламп имеют общую особенность: у них имеется отражающий слой. Однако у рефлекторных ламп направленная сила света несколько ниже, чем у щелевых, так как слой люминофора иа щели поглощает часть выходящего из щели потока излучения или светового потока. Зато у них выше стабильность светового потока, либо люминофор защищает стекло от ультрафиолетового излучения разряда. В щелевой же лампе это излучение вызывает соляризацию стекла, стекло со временем темнеет и световой поток снижается. В СССР выпускаются рефлекторные лампы ЛБР40, ЛХБР40, ЛБР80 и ЛХБР80.

Другие примеры отечественных ламп направленного светораспределения — щелевые лампы ЛЩ47 и ЛЩ47-1 синего света для электрографии и рефлекторные лампы ЛФР150, имеющие в спектре красную и синюю составляющие, для облучения растений при селекционировании их в вегетационных камерах, шкафах и стеллажах. В этом случае менее стабильный синий люминофор с высоким коэффициентом отражения используется в качестве диффузно отражающего слоя. Он также вносит вклад в создание синей составляющей спектра излучения лампы. Поверх синего наносится слой люминофора на основе окиси иттрия, активированной европием, с максимумом излучения в красной области спектра. Этот исключительно стабильный люминофор защищает менее стабильный от старения. Лампы ЛФР150 имеют высокую стабильность световых параметров, несмотря на большую удельную мощность.

С учетом опыта работы ламп ЛФР150 разработаны лампы ЛБР65 с люминесцентным отражающим слоем, благодаря чему КПД ламп повышен с обычных 78—80% до 86%.

14.6. ЭРИТЕМНЫЕ И БАКТЕРИЦИДНЫЕ ЛАМПЫ

Конструктивно эритемные и бактерицидные лампы подобны обычным люминесцентным лампам. Их особенности: применение других марок стекла для трубок — например, увиолевого; использование для

эритемных ламп иного типа люминофора (Э1, Э2, Э3) и отсутствие люминофора у бактерицидных ламп. Мощность эритемных ламп — 15, 30, 40 Вт, бактерицидных — 8, 15, 30 и 60 Вт. Лампы мощностью 8 Вт изготавливаются и из кварцевых, и из увиолевых трубок диаметром 17 мм.

Параметры излучения эритемных ламп: ЛЭ15 — 35 мэр/м²; ЛЭ30 — 85 мэр/м²; ЛЭР30 (рефлекторная) — 120 мэр/м²; ЛЭР40 (рефлекторная) — 140 мэр/м². Срок службы от 3 до 5 тыс. ч. Параметры излучения бактерицидных ламп: ДБ15 — 2,5 бакт; ДБ30-1 — 6,6 бакт; ДБ60 — 8 бакт; ДРБ8 — 3 бакт. Срок службы, также от 3 до 5 тыс. ч.

14.7. БЕЗРТУТНЫЕ НЕТОКСИЧНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

В дополнение к сказанному о безртутных лампах в гл. 13 следует отметить, что наиболее разработанным является вопрос создания цветных, в частности красных, неоновых ламп. Это объясняется тем, что из числа люминофоров, эффективных с точки зрения фотонного умножения, наиболее приемлемым является пока, как было сказано в § 13.1, окись иттрия, активированная европием, с максимумом излучения $\lambda \simeq 610$ нм. В сочетании с красным свечением неонового разряда удается получить лампы со световой отдачей $\eta_л = 23 \div 25$ лм/Вт вместо 8 лм/Вт у ртутных красных ламп и со световым потоком, соизмеримым со световыми потоками некоторых типов ртутных люминесцентных ламп за счет почти вдвое большего градиента потенциала положительного столба, а значит и общей мощности лампы ($E_{Ne} \simeq 1{,}3$ В/см; $E_{Hg} \simeq 0{,}7$ В/см). Так, неоновая лампа мощностью 40 Вт имеет габариты ртутной лампы мощностью 20 Вт, а ее световой поток находится в интервале 900—1000 лм вместо 330 лм у красной ртутной лампы (§ 14.4) длиной 1,2 м и 1200 лм у лампы ЛБ20 (см. табл. 11.1). Такие параметры реализуются при давлении неона 133 Па и рабочем токе около 500 мА. И снижение, и повышение давления приводят к уменьшению выхода резонансного излучения неонового разряда — к понижению светового потока ламп. Указанный рабочий ток получают при включении лампы с дросселем для стандартной ртутной люминесцентной лампы мощностью 40 Вт в сеть переменного тока с напряжением 220 В. Высокая световая отдача ламп определяется значительным видимым излучением неонового разряда (15—16 лм/Вт) и люминесценцией окиси иттрия, активированной европием (8—9 лм/Вт). Сложнее обстоит дело с созданием белых ламп, так как пока не удается разработать необходимые для этого достаточно эффективные синие и зеленые люминофоры.

14.8. ИСТОЧНИКИ СВЕТА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Тлеющий разряд характеризуется малой плотностью тока, низким давлением наполняющего газа или пара, высоким падением потенциала $U_к$ катода (50—400 В).

Лампы тлеющего свечения. Лампы используются для световой сигнализации в различных электротехнических и радиотехнических устройствах. Электроды у них расположены на малом расстоянии друг от друга (менее миллиметра). Свечение ламп определяется свечением приэлектродных областей разряда. Поэтому иногда применяется наименование — электродосветные лампы. Общий вид ламп тлеющего свечения показан на рис. 14.2. Наполняются они, как правило, неоново-гелиевой смесью с малой добавкой аргона для понижения напряжения зажигания разряда. Лампы включаются в сеть последовательно с активным балластным сопротивлением. Оно иногда встраивается в ножку или цоколь. На каждый тип ламп (их около 30) существуют свои технические условия.

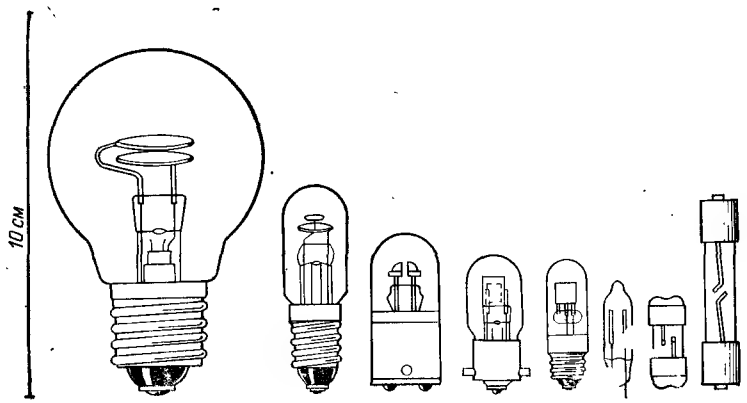


Рис. 14.2. Общий вид ламп тлеющего свечения

Люминесцентные лампы тлеющего разряда. Эти миниатюрные лампы отличаются тем, что внутренние стенки колбы покрываются люминофором. Сейчас выпускаются оранжевые, зеленые, голубые и желтые лампы. Общее число различных цветов приближается к 20.

Газосветные рекламные трубки. Это длинные, узкие (12—16 мм) трубчатые лампы тлеющего разряда с холодными катодами в виде стальных цилиндров с донышками. Цилиндры обращены открытым концом в сторону разряда (см. рис. 12.6,*е*). Свечение ламп определяется столбом разряда. Стенки трубок покрыты слоем люминофора. В отличие от люминесцентных трубчатых ламп дугового разряда световой поток, координаты цветности, спектральные характеристики ламп жестко не регламентируются, поскольку для рекламных целей важны не количественные параметры, а качественные — визуальное впечатление, которое создают лампы, форма трубок произвольная. Иногда реклама собирается из стандартных трубок-отрезков. В некоторых случаях трубки изготавливаются по заданному шаблону-калибру. Световая отдача

газосветных трубок 9—11 лм/Вт, яркость около $1 \cdot 10^3$ кд/м². Для ламп используются штифтовые цоколи. В сеть включаются несколько трубок последовательно на один трансформатор с большим магнитным рассеянием. Он позволяет получать высокое напряжение для зажигания ламп (3,5—10 и 1,2 кВ) и обеспечивать заданное значение рабочего тока (20—15 и 100 мА соответственно). Напряжение зажигания пропорционально длине трубок и равно для неоновых трубок диаметром 16 мм—1000 В/м, а для ртутно-аргоновых — 600 В/м.

Глава пятнадцатая

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Расчет параметров люминесцентных ламп (ЛЛ) при различных изменениях их конструкции имеет особо важное значение в связи с необходимостью оптимизации источников света в совокупности с приборами включения и с учетом эксплуатационных параметров и ламп, и приборов включения. В СССР эти исследования наиболее активно ведутся в МЭИ под руководством В. С. Литвинова. Другим обстоятельством, делающим полезным введение в учебник главы, посвященной расчету, является стремление собрать воедино данные, которые смогут быть использованы при выполнении курсовых проектов. При создании настоящей главы широко использовались материалы [20].

15.1. НАЗНАЧЕНИЕ РАССМАТРИВАЕМЫХ МЕТОДОВ

Методы расчета основных параметров и выявления наиболее рациональных решений по люминесцентным лампам нужны для:

оценки изменений электрических и светотехнических параметров освоенных промышленностью и широко применяемых ламп на разных этапах их совершенствования (например, изменением параметров наполняющей среды и люминофоров, а также вариациями диаметра трубок и расстояния между электродами);

оценки влияния технологических отклонений на качество ламп для выбора наиболее действенных способов введения параметров ламп в заданное поле допусков;

оценки влияния условий эксплуатации на основные параметры ЛЛ и изыскания решений, позволяющих ослабить отрицательное действие имеющих место тяжелых условий эксплуатации;

разработки новых типов люминесцентных ламп, отличающихся по мощности, способам зажигания, условиям эксплуатации.

Кроме того, расчет позволяет выявить принципиально возможные параметры ламп при различных геометрии трубок, роде и давлении наполняющего газа и конструкции катодного узла.

15.2. ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Для расчета основных параметров ламп и выявления наиболее эффективных вариантов используются следующие зависимости:

$$P_л = k_л U_л I_л; \quad (15.1)$$

$$U_л = U_{ст} + U_{ак} + U_{эл}; \quad (15.2)$$

$$l_{ст} = \frac{U_л - U_{ак} - U_{эл}}{E(I_л, d_1, p_{и,г}, M_{и,г}, p_{Hg}; f)}; \quad (15.3)$$

$$\Phi_0 = \Phi_{1ст} l_{ст}; \quad (15.4)$$

$$\Phi_н = \Phi_0 (1 - a\omega); \quad (15.5)$$

$$\Phi_{ср} = \Phi_н (1 - b\omega); \quad (15.6)$$

$$\Phi_р \approx \Phi_н (1 - 1{,}37 b\omega); \quad (15.7)$$

$$U_{др} = U_с \sqrt{1 - m^{*2} - 1{,}14 m^* \delta \sqrt{1 - 1{,}25 m^{*2}}}, \quad (15.8)$$

где $P_л$ — мощность лампы; $I_л$ — рабочий ток; $k_л$ — коэффициент мощности лампы; $U_л$, $U_{ст}$, $U_{ак}$, $U_{эл}$, $U_с$ — напряжения на лампе, на столбе, в анодно-катодной области, на электродах, напряжение сети; $l_{ст}$ — длина положительного столба разряда; $E = E(I_л, d_1, p_{и,г}, M_{и,г}, p_{Hg}, f)$ — градиент потенциала положительного столба, зависящий от тока $I_л$ внутреннего диаметра трубки d_1, рода $M_{и,г}$, давления инертного газа $p_{и,г}$, давления паров ртути p_{Hg}, частоты питающего напряжения f; Φ_0, $\Phi_{1ст}$, $\Phi_н$, $\Phi_{ср}$, $\Phi_р$ — соответственно начальный (0 ч) световой поток лампы, начальный удельный световой поток столба, номинальный (100 г), средний ($t = \tau_{ср}$) и расчетный ($t = 0{,}8\tau_{ср}$) световые потоки ламп; a, b — коэффициенты, характеризующие нестабильность люминофоров в процессе эксплуатации ламп ($b/a = 2{,}2 \div 2{,}5$); ω — удельная электрическая нагрузка [$\omega = P_{ст}/A_{ст}$, где $P_{ст}$ — мощность положительного столба ($P_{ст} = k_{ст} I_{ст} U_{ст}$), $A_{ст}$ — поверхность трубки в области положительного столба ($A_{ст} = \pi d_2 l_{ст}$, где d_2 — наружный диаметр трубки). При этом $k_{ст} = k(d, m^*, p_{н,г}, M_{и,г})$ — коэффициент мощности столба. Для инженерных расчетов можно считать, что $k_{ст} = k_л$]; $U_{др}$ — напряжение на дросселе, $m^* = U_л/U_с$ $\left(1 + 0{,}8 \frac{P_\delta}{P_л}\right)$. Здесь P_δ — потери мощности в дросселе; δ — параметр, характеризующий изменение во времени (за полпериода) напряжения на лампе ($\delta \simeq 0{,}15 \div 0{,}2$).

При расчетах по формулам (15.1)—(15.8), если нет других ограничений, принимаются следующие допущения: при $d_2 = 38$ и 25 мм $k_л$ равен соответственно 0,89 и 0,87.

Градиент потенциала положительного столба можно брать в первом приближении из табл. 15.1 (20, 18), хотя здесь он приведен для температур холодной зоны (холодной точки) $t_{х,з}$ ($t_{х,т}$) $= 40 \div 44$ °С. Для температур, значительно бо́льших 44 °С, необходимо вводить

поправки, о которых будет сказано ниже. Значения градиента потенциала для разряда с Ne, Kr и Xe следует брать также в [20, 18]. На основе формулы (13.2) определяется Φ_0, поскольку можно считать, что $\Phi_0 \simeq \Phi_{1ст} l_{ст}$ [см. (15.4)]. При этом следует принимать во внимание, что: 1) квантовый выход при возбуждении линией 254 нм следует

Таблица 15.1

d_2, мм ($t_{х,т}$, °С)	$p_и$, г, Па (мм рт. ст.)	Значения градиента потенциала E, В/см, для разряда в смеси паров ртути с аргоном при токах (А):							
		0,1	0,3	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
19 (44)	530 (4,0)	1,7	1,43	1,16	0,99	0,79	0,65	—	—
	265 (2,0)	1,68	1,43	1,22	1,05	0,84	0,73	—	—
	67 (0,5)	1,65	1,49	1,33	1,18	1,05	0,94	—	—
	9,5 (0,07)	1,62	1,53	1,46	1,40	1,36	1,30	—	—
25 (40)	530 (4,0)	1,35	1,20	1,00	0,83	0,65	0,52	—	—
	265 (2,0)	1,18	1,03	0,91	0,79	0,64	0,55	—	—
	67 (0,5)	1,09	0,99	0,88	0,78	0,69	0,62	—	—
	9,5 (0,07)	1,00	0,94	0,87	0,84	0,75	0,67	—	—
38 (40)	530 (4,0)	0,94	0,87	0,78	0,67	0,55	0,488	0,41	0,36
	265 (2,0)	0,85	0,79	0,71	0,63	0,54	0,48	0,43	0,39
	67 (0,5)	0,79	0,73	0,67	0,61	0,56	0,41	0,48	0,45
	9,5 (0,07)	0,69	0,67	0,63	0,60	0,55	0,53	0,51	0,49
54 (42)	530 (4,0)	0,84	0,79	0,72	0,62	0,5	0,42	0,35	0,31
	265 (2,0)	0,72	0,68	0,65	0,55	0,46	0,40	0,35	0,31
	67 (0,5)	0,64	0,61	0,56	0,53	0,47	0,42	0,37	0,35
	9,5 (0,07)	0,57	0,55	0,53	0,50	0,46	0,43	0,40	0,37

брать равным около 0,9; поскольку надежных данных для современных промышленных люминофоров при возбуждении их линней 185 нм в литературе нет, рекомендуется условно брать $\eta_{кв\,185}=1$; 2) составляющую, обусловленную видимым излучением разряда, Φ_V при инженерных оценках можно определять, используя установленные в МЭИ экспериментальные связи: при $d_2=38$ мм $\Phi_V=(4{,}5\div5{,}7)Il_{ст}$ (4,5 — при аргоновом, 5,7 — при неоновом наполнении ламп). По тем же данным можно считать, что

$$\Phi_{Vd}/\Phi_{V38} \approx 38/d \text{ при } I=\text{const}$$

(Φ_{Vd} и Φ_{V38} — световые потоки в трубках диаметром d и 38 мм соответственно); 3) для отечественных люминофоров коэффициент b в формуле (15.6) находится в пределах от 4 до 7.

Значение m, равное $U_л/U_c$, при многовариантном расчетном поиске при $p_л=\text{const}$ должно быть в пределах $0{,}4<m<0{,}65$ по следующим соображениям: 1) при $m<0{,}4$ должен быть увеличен ток при уменьшении длины трубки, что приводит к снижению световой отдачи;

кроме того, повышается стоимость ПРА; 2) при $m>0{,}65$ резко возрастает коэффициент нестабильности при отклонениях напряжения сети от номинального значения, из-за чего заметно ухудшаются расчетные параметры лампы в эксплуатационных условиях.

15.3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

1. Если дана температура стенок трубки $t°_{ст}=38\div44$ °С (т. е. она близка к оптимальной) либо в лампе каким-либо иным образом поддерживается оптимальное давление паров ртути и нужно оценить световые параметры лампы при заданных d, $p_{и,г}$, $M_{и,г}$, m, то расчет проводится в следующей последовательности: определяются $U_{ст}=U_л-U_{а,к}-U_{эл}$ и $I=P_л/R_лU_л$, для чего по табл. 15.2 находят $U_к$ ($U_а\approx4\div6$ В; $U_{эл}\approx3\div3{,}5$ В), далее по табл 15.1 находят E, после чего по формуле (15.3) вычисляют $l_{ст}$. По формулам (13.2) и (15.4) определяют Φ_0, затем $\Phi_н$ — по формуле (15.5), $\Phi_{ср}$ — по формуле (15.6) и $\Phi_р$ — по формуле (15.7). Для расчета Φ_0 при заданных I, d,

Таблица 15.2

$p_{и,г}$, Па (мм рт. ст.)	Значения катодного падения потенциала $U_к$, В, для наполняющих паров			
	Ne	Ar	Kr	Xe
530 (4,0)	11	8,5	6	4,5
265 (2,0)	15	9,5	7	5,5
67 (0,5)	18	11	8	6,5
9,5 (0,07)	22	12	10	8,5

Примечание. Давление паров ртути 0,8 Па ($6\cdot10^{-3}$ мм. рт. ст.)

$p_{и,г}$, $M_{и,г}$ из табл. 15.3 находят удельные потоки излучения двух резонансных линий. Удельные потоки излучения для разряда с неоном Ne, криптоном Kr, ксеноном Xe приведены в [20, 18].

Далее по формулам, приведенным в § 13.1 (расчет предельной световой отдачи люминесцентных ламп), находят нужные световые параметры: начальный световой поток или световую отдачу лампы. Значения $\eta_{кв\,254}$ можно найти в (13), $\eta_{кв\,185}$ берут равным 1. При расчете принимается, что $\eta_{сл}A_{уф}\approx0{,}9\div0{,}92$.

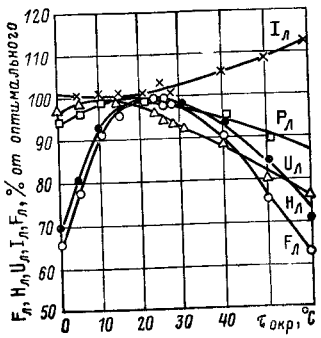
2. Если определяются параметры лампы со ртутью при заданной мощности, а давление паров ртути существенно отличается от оптимального, например при $t°_{ст}\gg44$ °С, то вначале расчет проводится для 38—44 °С, как было показано в п. 1. После этого вводятся поправки к электрическим и световым параметрам на основании температурных зависимостей рис. 15.1, взятых из ГОСТ 6825-74. Пользуясь этими зависимостями, считают, что максимум световой отдачи имеет место при температуре стенки, указанной в табл. 15.1, а отклонение $t_{ст}$ от ука-

Таблица 15.3

$d_г$, мм ($t_{х,т}$, °С)	$p_н$, г, Па (мм рт. ст.)	Удельный поток излучения резонансных линий в относительных единицах при токах (аргон, ртуть) I, А							
		0,1	0,3	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
λ=184,9 нм; 1 отн. ед.=0,028 Вт/см									
19 (44)	530(4,0)	0,52	1,41	2,22	2,90	3,94	4,57	—	—
	265(2,0)	0,46	1,51	2,41	3,15	4,33	5,32	—	—
	67(0,5)	0,50	1,70	2,81	3,72	5,55	6,94	—	—
	9,5(0,07)	0,46	1,26	2,44	3,55	6,02	7,97	—	—
25 (40)	530(4,0)	0,39	0,74	1,85	2,41	3,24	3,61	—	—
	265(2,0)	0,38	0,74	1,97	2,64	3,57	4,18	—	—
	67(0,5)	0,36	0,71	2,06	3,04	4,42	5,06	—	—
	9,5(0,07)	0,31	0,63	1,85	2,92	4,80	5,96	—	—
38 (40)	530(4,0)	0,25	0,74	1,32	1,91	2,88	3,38	3,59	3,82
	265(2,0)	0,25	0,74	1,39	2,10	3,34	3,88	4,28	4,53
	67(0,5)	0,24	0,72	1,39	2,24	3,99	4,72	5,38	5,87
	9,5(0,07)	0,21	0,63	1,28	2,12	3,99	5,29	6,13	6,28
54 (42)	530(4,0)	0,16	0,48	0,94	1,47	2,35	2,83	3,08	3,34
	265(2,0)	0,16	0,18	0,99	1,49	2,54	3,17	3,61	3,84
	67(0,5)	0,15	0,46	0,95	1,51	2,75	3,61	4,20	4,62
	9,5(0,07)	0,10	0,36	0,74	1,22	2,39	3,86	4,15	4,68
λ=253,7 нм; 1 отн. ед.=0,175 Вт/см									
19 (44)	530(4,0)	0,35	0,82	1,20	1,54	2,09	2,23	—	—
	265(2,0)	0,37	0,87	1,38	1,86	2,57	2,96	—	—
	67(0,5)	0,32	0,81	1,42	2,02	3,22	4,07	—	—
	9,5(0,07)	0,20	0,53	0,99	1,52	2,72	3,74	—	—
25 40	530(4,0)	0,33	0,83	1,29	1,59	2,14	2,32	—	—
	265(2,0)	0,31	0,78	1,35	1,84	2,64	3,10	—	—
	67(0,5)	0,32	0,83	1,45	2,06	3,30	4,22	—	—
	9,5(0,07)	0,27	0,74	1,35	2,10	3,57	4,67	—	—
38 (40)	530(4,0)	0,30	0,80	1,33	1,68	2,21	2,48	2,56	2,60
	265(2,0)	0,28	0,76	1,31	1,77	2,58	2,99	3,29	3,47
	67(0,5)	0,28	0,78	1,34	1,95	3,15	3,78	4,31	4,78
	9,5(0,07)	0,23	0,64	1,18	1,86	3,18	4,30	5,22	6,02
54 (42)	530(4,0)	0,25	0,67	1,18	1,57	2,18	2,52	2,62	2,71
	265(2,0)	0,24	0,67	1,24	1,68	2,48	3,01	3,36	3,58
	67(0,5)	0,21	0,60	1,15	1,75	2,90	3,68	4,29	4,76
	9,5(0,07)	0,20	0,58	1,11	1,72	3,02	4,18	4,93	5,66

занной равнозначно превышению температуры окружающей среды над $t_{окр,опт}$, при которой имеет место максимум светового потока.

3. Если требуется рассчитать $U_л$, $I_л$ и световые параметры при заданной мощности ($P_л$=const) для ламп с различной длиной трубки $l_л$ (или длиной столба $l_{ст}$), диаметром трубки d, родом $M_{и,г}$ и давлением $p_{и,г}$ наполняющего газа, расчет проводится в следующей последовательности; для $l_i(l_{ст\,i})$, d_i, $p_{и,г\,i}$, $M_{и,г\,i}$ строится зависимость



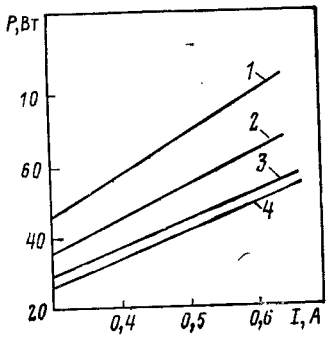


Рис. 15.1. Температурная зависимость параметров ламп

Рис. 15.2. Пример зависимости мощности лампы от рабочего тока: *1* — диаметр трубки 19 мм; *2* — 25 мм; *3* — 38 мм; *4* — 54 мм

$P_{л\,i}=P(I_i)$. Ее пересечение с горизонтальной прямой, проведенной на уровне заданной мощности лампы, позволит определить ток лампы $I_{iх}$ для i-го варианта исходных параметров ($l_{ст}$, d, $p_{и,г}$, $M_{и,г}$), при котором обеспечивается искомая мощность лампы. Аналогично проводится расчет и для иных сочетаний $l_{ст}$, d, $p_{и,г}$ и $M_{и,г}$. Для найденных значений тока ламп $I_{iх}$—$I_{jх}$ определяются Φ_0, $\Phi_н$, $\Phi_{ст}$ и $\Phi_р$, позволяющие провести сопоставление ламп. На рис. 15.2 показано в качестве примера определение значений тока $I_{iх}$—$I_{jх}$ при $P_л$=40 Вт, аргоновом наполнении, $p_{и,г}$=330 Па (2,5 мм рт. ст.) и переменных диаметрах трубки. Как видно, мощности 40 Вт соответствует рабочий ток $I_{iх}$=0,36 А при диаметре трубки 25 мм и $I_{jх}$=0,44 А при диаметре 38 мм.

4. При сопоставлении вариантов ламп с $p_{и,г}$=const; $M_{и,г}$=const; l=const, отличающихся значениями диаметра трубки, установлено, что лучшим вариантом, как показали расчеты, проведенные в МЭИ, является тот, у которого имеет место наибольший расчетный световой поток $\Phi_р$, полученный с учетом спада светового потока.

В общем случае наиболее эффективные варианты ламп для установок промышленного освещения без особых требований к цветопередаче следует осуществлять, используя информацию о годовых приве-

денных затратах на установку ($З_{ОУ}$) при применении сопоставляемых источников света.

Как известно,

$$З_{ОУ} = C' + K'/T_н, \qquad (15.9)$$

где C' — годовые эксплуатационные расходы, состоящие из затрат на электроэнергию $C_э$, на замену ламп $C_л$, амортизацию $C_а$, обслуживание C_0 и на чистку $C_ч$, тогда $C' = C_э + C_л + C_а + C_0 + C_ч$; K'-капитальные вложения на установку, состоящие из затрат на лампы ($K_л$), ПРА ($K_{ПРА}$) и светильники, включая монтаж ($K_{св}$), в итоге $K' = K_л + K_{ПРА} + K_{св}$; $T_н$ — нормативный срок окупаемости капитальных вложений ($T_н = 6{,}7$). Для расчета K' используются следующие данные: $K_л = g_л n_л$, где $g_л$ — стоимость одной лампы; $n_л$ — число ламп в установке. При этом $n_л = \Phi_\Sigma/\Phi_л$, где $\Phi_л$ — световой поток лампы, а Φ_Σ — суммарный световой поток всех ламп в установке, обеспечивающий требуемый уровень освещенности.

Аналогично: $K = g_{ПРА} n_{ПРА}$, где $g_{ПРА}$ — стоимость ПРА, а $n_{ПРА}$ — количество ПРА; $n_{ПРА} = n_л/M_{ПРА}$, где $M_{ПРА}$ — число ламп, одновременно подключаемых к одному аппарату, $K_{св} = g_{св} n_{св}$, где $g_{св}$ — стоимость светильника без ПРА, а $n_{св}$ — число светильников $n_{св} = n_л/M_{св}$, где $M_{св}$ — число ламп в одном светильнике.

Составляющие C' величины определяются так:

$$C_э = n_л P_л \beta T g_{эн}\left(1 + \frac{\Delta U\%}{100}\right),$$

где $P_л$ — мощность одной лампы, кВт; β — коэффициент, учитывающий потери мощности в ПРА (обычно равен 1,1—1,25); T — число часов горения ламп в год ($T = 750 \div 6300$ ч); $g_{эн}$ — тариф на электроэнергию; $\Delta U\%$ — падение напряжения в осветительной сети до среднего светильника линии ($\Delta U\% = 2{,}5\%$);

$$C_л = K_л T/t,$$

где t — средний срок службы ламп;

$$C_а = (K' - K_л)\frac{\alpha}{100},$$

где α — процент амортизационных отчислений ($\alpha = 15\%$);

$$C_0 = 0{,}02(K' - K_л - K_{св});$$

$$C_ч = C_{ч1} n_{св} \frac{12}{t_ч},$$

где $C_{ч1}$ — стоимость чистки одного светильника ($C_ч = 0{,}2 \div 0{,}4p$); $t_ч$ — интервал между чистками, в мес ($t_ч = 1 \div 3$ мес).

В свою очередь

$$З_{ОУ} = З_{ОУ1} n_л; \qquad (15.10)$$

где $З_{ОУ1}$ — годовые приведенные затраты по ОУ в расчете на одну лампу; $n_л$ — количество ламп в установке.

Так как $n_л = \dfrac{M\Phi_\Sigma}{\Phi_р}$, где $M\Phi_\Sigma$ — постоянная величина, то $З_{ОУ} = \dfrac{M\Phi_\Sigma}{\Phi_р} З_{ОУ1}$.

Относительную эффективность i-го варианта лампы по сравнению с исходным можно оценить, используя очевидную связь

$$\frac{З_{ОУi}}{З_{ОУисх}} = \frac{\Phi_{р,\,исх}}{\Phi_{рi}} \frac{З_{ОУi}}{З_{ОУисх}}. \qquad (15.11)$$

При сопоставлении вариантов ламп следует учитывать, что при индуктивном балласте стоимость дросселя $g_{др} \approx Z\sqrt{V_{эф}l}$, причем постоянную Z можно определить по дросселю для лампы мощностью 40 Вт: $g_{др40} \approx 1{,}9p$ и $Z = \dfrac{1{,}9}{\sqrt{V_{др40}0{,}43}}$.

Стоимость ламп можно определить с учетом выражения $g_л = A_л + B_л \times ld$, где $A_л$ и $B_л$ — постоянные, определяемые по двум лампам одной цветности из числа ламп массового производства; стоимость двухлампового светильника $g_{св2} = A_{св} + B_{св}l$, где $A_{св}$ и $B_{св}$ также находятся по двум светильникам, отличающимся лишь длинами. Таковы некоторые связи, последовательности расчета и данные, позволяющие решать задачи, перечисленные в § 15.1, и выполнять курсовые проекты по расчету люминесцентных ламп.

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Глава шестнадцатая

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМПАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Во всем многообразии применяющихся в настоящее время источников света газоразрядные лампы высокого давления занимают важное место. Прогрессирующее развитие этих ламп приводит к постоянному увеличению их доли в общем объеме выпускаемых источников света, благодаря чему количество света, генерируемого газоразрядными лампами высокого давления в мире, составляет около 40 % [12]. Ожидается, что в будущем это количество значительно возрастет. Указанное предопределяет важность процесса конструирования различных типов газоразрядных ламп высокого давления, основным аспектам которого посвящены последующие главы.

16.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В газоразрядных источниках света высокого давления, так же как и во всех газоразрядных лампах, электрическая энергия преобразуется в оптическое излучение при прохождении электрического тока через газы или пары металлов. Большую часть газоразрядных ламп высокого давления составляют стационарные источники света, меньшую — импульсные. Однако для обеих форм разряда можно выделить характерные по физическим процессам и по характеру излучения области — приэлектродные части и положительный столб разряда. В подавляющем большинстве случаев используются лампы с излучением положительного столба, КПД которого значительно выше, чем у других частей разряда.

Кратко остановимся на процессах, происходящих в положительном столбе разряда высокого давления и обусловливающих генерацию оптического излучения. Основным процессом является ускорение свободных электронов электрическим полем, создаваемым внешним источником энергии. Движущиеся электроны, обеспечивающие электрический ток в лампе, при столкновении с атомами передают им часть кинетической энергии, которая запасается в виде потенциальной энергии атома и сопровождается переходом электронов на более высокие энергетические уровни. В последующем при переходе электронов на более низкие энергетические уровни происходит излучение энергии, распределение которой по спектру определяется расположением энергетических уровней излучающих атомов. Другим видом столкновений электронов, приводящих к излучению, является изменение траекторий движения электронов при их взаимодействии с другими электронами, а также ионами и атомными ядрами. Отклонение электронов от первоначального пути создает ускорение, которое согласно электромагнитной теории сопровождается излучением, обладающим широким спектром частот. Для реальных условий, существующих в газоразрядных лампах высокого давления, указанные процессы маловероятны и поэтому спектр излучения положительного столба имеет в большинстве случаев линейчатый характер с незначительным по всему оптическому диапазону фоном. Возможность получения линейчатого спектра составляет одно из главных достоинств газоразрядных ламп высокого давления, так как выбором вида излучающих атомов можно обеспечить наличие линий в необходимом участке спектра (например, в области, ограниченной кривой относительной спектральной световой эффективности) с интенсивностью, близкой к интенсивности излучения черного тела (т. е. к теоретическому пределу), их отсутствие или очень слабую интенсивность в остальных участках спектра. При этом температура, которая определяет интенсивность излучения, о чем будет более подробно указано ниже, в лампах высокого давления может быть получена на уровне 6000 К и выше. Следовательно, электрический разряд сочетает в себе возможности получения не только высоких температур, недостижимых в случаях твердых или жидких веществ, но и выбора необходимого спектра излучения.

В качестве примера на рис. 16.1 приведены спектры излучения некоторых элементов таблицы Д. И. Менделеева.

Реализация необходимых параметров источников света возможна при достижении достаточно высокой концентрации свободных электронов, обладающих энергией, необходимой для возбуждения нормальных атомов. Наличие свободных электронов приводит к появлению практически такого же числа положительных ионов, образующихся в результате отрыва электронов от нормальных атомов. Получаемая смесь электронов и положительных ионов в газоразрядной лампе называется плазмой.

Для плазмы газоразрядных ламп высокого давления характерно соблюдение определенных зависимостей. Так, при возрастании плотности тока и давления наполняющего лампу газа или пара увеличивается общее число различных соударений между электронами и атомами газа и возрастает концентрация возбужденных атомов, вследствие чего вторичные процессы с участием этих атомов начинают играть все

большую роль. Вместе с этим растет также плотность излучения и число актов поглощения. Состояние плазмы постепенно приближается к равновесию между различными видами соударений электронов с атомами газа и оптическими процессами. При установлении равновесия распределение частиц описывается законами статистики и термодинамики, т. е. концентрации частиц являются функциями температуры. Так как плазма в газоразрядных лампах содержится обычно внутри газонаполненной стеклянной колбы, основной параметр дуги высокого давления — температура имеет сложное распределение в пространстве. Вблизи стенок колбы, в так называемых периферийных зонах, темпе-

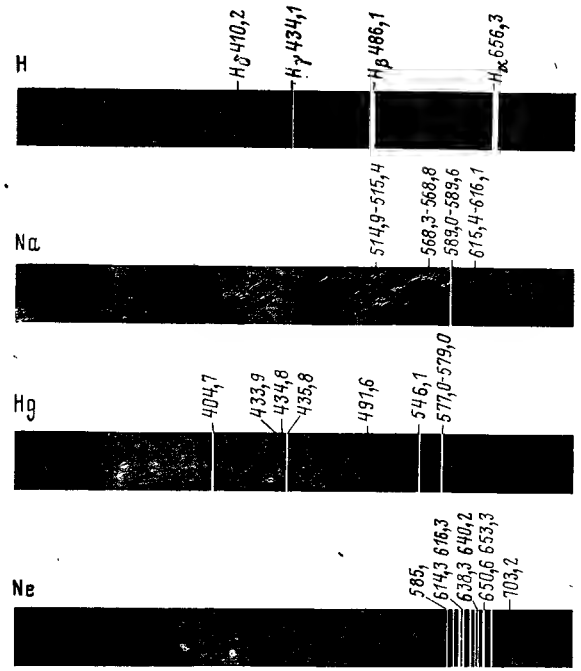


Рис. 16.1. Спектры излучения различных элементов H, Na, Hg и Ne

ратура наполнения низкая, не превышающая нескольких сотен градусов Кельвина; ближе к центру начинает расти концентрация электронов и, как следствие, увеличивается число соударений; образуется канал, проводящий ток; температура возрастает. Вблизи оси разряда формируется светящийся шнур, представляющий собой плазму разряда высокого давления. Поскольку большинство газоразрядных ламп работает на переменном токе промышленной частоты, т. е. ток меняет направление сто раз в секунду, возрастая от нуля до максимума, то соответственно меняются и параметры положительного столба разря-

да. Показано, что время установления концентраций частиц и температуры при этом значительно меньше периода изменения питающего лампу напряжения [21].

В связи с наличием пространственно-временной неоднородности разряда высокого давления введено понятие квазиизотермичности положительного столба, согласно которому в каждой бесконечно малой области столба в каждый момент времени температуры всех компонентов плазмы почти одинаковы. Квазиизотермическая плазма столба отличается от термодинамически равновесной тем, что различные участки столба могут иметь различные температуры, а кроме того, отсутствует равновесие между частицами и полем излучения.

16.2. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЛАМП

Электрические источники света обязаны своим возникновением открытию в 1802 г. явления электрической дуги русским физиком В. В. Петровым. Последующие усовершенствования привели к созданию разнообразных конструкций электродосветных ламп, в частности современных мощных интенсивных дуговых ламп, применяемых в кинопроекции и прожекторной технике.

Благодаря значительно бо́льшим потенциальным возможностям достижения высоких значений КПД у газоразрядных ламп по сравнению с лампами накаливания с начала XX в. проводятся многочисленные работы, направленные на создание новых типов газоразрядных ламп, в частности высокого давления. Газоразрядные лампы получают все большее распространение в лабораторной практике, технике, используются также и для освещения. До 50-х годов в газоразрядных лампах высокого давления использовался в основном разряд в парах ртути, натрия и ксеноне. В лабораториях Всесоюзного электротехнического института, Государственного оптического института, Московского электролампового завода, а также других научных учреждениях и на заводах разрабатывается значительное количество разнообразных газоразрядных ламп, организовывается их производство. Начиная с 50-х годов получают более широкое применение для целей освещения ртутно-кварцевые лампы высокого давления с исправленной цветностью (лампы типа ДРЛ), обладающие высокими световой отдачей (до 55 лм/Вт) и сроком службы (свыше 10 тыс. ч). В настоящее время выпуск ламп этого типа во всем мире составляет несколько миллионов штук в год и продолжает неуклонно расти. Увеличению объема производства ламп способствовало создание и ввод в действие механизированных линий по выпуску газоразрядных источников света. Значительные усовершенствования претерпели также натриевые лампы, получившие распространение для освещения автострад, автомобильных стоянок, туннелей, а также применяющиеся для декоративного освещения. Расширилось использование ксеноновых ламп высокого давления, вытеснивших открытую угольную дугу в кинопроекционном

освещении. Мощные ксеноновые трубчатые лампы, достигшие единичной мощности в десятки киловатт, все чаще применяются для освещения больших открытых пространств (например, карьеров).

В начале 60-х годов появились новые перспективы развития газоразрядных источников высокого давления.

Во-первых, изобретение ламп накаливания с йодным циклом натолкнуло на мысль использовать циклы в парах простейших химических соединений в газовом разряде. Перед разработчиками открылась возможность создавать лампы, обладающие разнообразным распределением энергии излучения в оптическом диапазоне спектра — от практически однородного до непрерывного, с сохранением высокого КПД, присущего газоразрядным источникам света. Стало возможным удовлетворить потребности ряда отраслей народного хозяйства, таких как полиграфическая, химическая, сельское хозяйство и др. Благодаря работам Всесоюзного института источников света им. А. Н. Лодыгина и Всесоюзного светотехнического института была создана и освоена промышленностью широкая номенклатура источников как для утилитарного (уличного и промышленного), так и специального (телевизионного, киносъемочного) освещения. Их световая отдача более чем в 2 раза превышает светоотдачу ламп типа ДРЛ, а значение индекса цветопередачи достигает 90.

Во-вторых, весьма интересным в создании новых газоразрядных источников света высокого давления явилась разработка колб для этих ламп из окислов некоторых элементов, в частности из поликристаллической окиси алюминия или монокристалла, полученного из расплава окиси алюминия. Указанные материалы имеют гораздо более высокие температуры плавления по сравнению с температурой размягчения кварцевого стекла, что позволяет значительно увеличить рабочие температуры источников света. Кроме того, в силу значительной химической стойкости такие колбы хорошо противостоят воздействию паров щелочных металлов, что дает возможность создавать источники света на основе разрядов в парах натрия, цезия и т. п. В настоящее время разработаны и выпускаются промышленностью натриевые лампы высокого давления в колбах из поликристаллической окиси алюминия со световой отдачей, достигающей 120 лм/Вт, сроком службы, превышающим десятки тысяч часов, обладающие хорошим индексом цветопередачи.

Развитие источников света в указанных направлениях весьма перспективно, и от него следует ожидать в дальнейшем больших практических результатов.

16.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрение всего многообразия газоразрядных источников света высокого давления лучше всего осуществить в систематизированном

виде, на основе принципа, заложенного в основу их классификации. Наиболее целесообразно подразделить источники излучения на типы, исходя из отличительных конструктивных признаков в оболочке и наполнении лампы. Эти данные приведены в табл. 16.1. В классификацию не включены некоторые специальные типы ламп (например, высокочастотные безэлектродные).

16.4. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Благодаря техническим достоинствам (высокая световая отдача, большой срок службы, возможность изменения спектра и т. п.) газоразрядных ламп высокого давления их использование в различных отраслях народного хозяйства постоянно расширяется. В основном они применяются для целей общего освещения.

Лампы типа ДРЛ, как уже указывалось, применяются для уличного освещения. Эти же источники света устанавливаются в производственных помещениях, где требования к качеству цветопередачи не очень высоки, а требуемые уровни освещенности не могут быть обеспечены лампами накаливания. Газоразрядные лампы высокого давления с добавками галогенидов металлов благодаря более высоким световой отдаче и индексу цветопередачи начинают применяться в осветительных установках административных зданий, а также для местного освещения (лампы мощностью 250—1000 Вт). Карьеры и большие открытые пространства (площади, стоянки автомобилей), туннели, как правило, освещаются натриевыми лампами высокого давления, обеспечивающими за счет световой отдачи свыше 100 лм/Вт необходимый уровень освещенности при низкой установленной мощности. Спектр излучения этих ламп имеет выраженную желто-оранжевую составляющую, способствующую увеличению остроты зрения. Ксеноновые трубчатые лампы большой единичной мощности применяются для освещения карьеров, территорий сортировочных железнодорожных станций, мест погрузочно-разгрузочных работ и т. п. Специфические требования проведения телевизионных передач, киносъемочного освещения привели к использованию источников со спектром излучения, имеющим высокий индекс цветопередачи, с достаточно стабильной цветовой температурой и световой отдачей на уровне 90 лм/Вт. Такие лампы применяются в осветительных установках спортивных сооружений, зрелищных предприятий, а также в приборах теле- и киноосветительной техники. Ксеноновые газоразрядные лампы с короткой дугой устанавливаются в кинопроекторах. Причем требование увеличить мощность источников света для возможности показа широкоформатных цветных фильмов привело к появлению разборных ксеноновых ламп мощностью 5, 10 кВт и более с водоохлаждаемыми электродами. Ртутные, а также ртутные трубчатые лампы с добавками галогенидов металлов, обладающие максимумом излучения в ближней ультрафиолетовой и фиолетовой частях спектра, применяются в рентгенографии. Наличие зна-

Таблица 16.1. Основные типы газоразрядных источников излучения высокого и сверхвысокого давления

Тип источника	Наполнение, рабочее давление, характер разряда и область свечения	Характер излучения
Газосветные лампы		
Лампы ртутные высокого давления:		
трубчатые из тугоплавкого стекла с естественным охлаждением	Пары ртути, 20—80 кПа, инертный газ, дуговой разряд, положительный столб	Спектр линейчатый, наиболее интенсивные спектральные линии ртути 253,7; 265,2; 296,7; 302,2/26; 312,6/32; 365,0/63; 404,7/78; 435,8; 546,1; 577,0/91 и 1014 нм
трубчатые из кварцевого стекла с естественным охлаждением	Пары ртути, 100—1500 кПа, инертный газ, дуговой разряд, положительный столб	
лампы ртутно-кварцевые исправленной цветности с люминофором	Пары ртути, 0,5—1,2 МПа, инертный газ, дуговой разряд, положительный столб, люминофор, покрывающий наружную колбу	Основная часть — спектральные линии ртути, дополнительная — излучение люминофора, возбужденного ультрафиолетовым излучением ртутного разряда
Лампы ртутные кварцевые сверхвысокого давления:		
капиллярные с водяным охлаждением	Пары ртути, 4—10 МПа, инертный газ, дуговой разряд, положительный столб	Спектральные линии возбужденных атомов ртути и интенсивный непрерывный фон. Полосы поглощения в области резонансных линий
с короткой дугой в шаровой колбе с естественным охлаждением	Пары ртути, 1—6 МПа, инертный газ, дуговой разряд, положительный столб, катодное пятно	
Лампы газовые высокого давления:		
трубчатые с естественным охлаждением	Ксенон, реже криптон или аргон, 50—150 кПа, дуговой разряд, положительный столб	Спектр непрерывный от 220 до 1200 нм
трубчатые с водяным охлаждением		
Лампы газовые сверхвысокого давления:		
капиллярные с колбами из кварцевого стекла с водяным охлаждением	Ксенон, реже криптон или аргон, до 1,5 МПа, дуговой разряд, положительный столб	Спектр непрерывный от 220 до 1200 нм
шаровые из кварцевого стекла с естественным охлаждением		
шаровые из кварцевого стекла разборные с водяным охлаждением		
металлические разборные с водяным охлаждением		
Лампы ртутные кварцевые с добавками галогенидов металлов:		
трубчатые с естественным охлаждением	Ртуть, инертный газ, галогениды металлов, дуговой разряд, положительный столб	Излучение, характерное для металла добавки (линейчатое для элементов III группы таблицы Д. И. Менделеева, многолинейчатое — для редкоземельных элементов), линии ртути, непрерывный фон
шаровые с компактной дугой с естественным охлаждением		
Лампы с колбами из поликристаллических (керамических) материалов, с прозрачной и матированной наружной колбой	Натрий, реже цезий, инертный газ, дуговой разряд, положительный столб	Непрерывный спектр с самообращенными максимумами излучения в области резонансных линий
Импульсные лампы:		
трубчатые	Ксенон, реже аргон, неон и др., 20 кПа	Спектр, приближающийся к непрерывному
шаровые	То же, 0,5 МПа	
Электродосветные лампы		
Лампы с вольфрамовыми электродами в среде газов или паров	Аргон, реже пары ртути, дуговой разряд до 10 кПа	Излучение вольфрама при температуре до 3200 К, слабые линии наполняющего газа
Открытые дуги с электродами из углерода	Атмосферный воздух	Тепловое излучение углерода при температуре сублимации
Открытые дуги с электродами, содержащими присадки редкоземельных элементов	Атмосферный воздух, пары соединений редкоземельных элементов	Многолинейчатое излучение редкоземельных элементов, непрерывное тепловое излучение

чительной составляющей ультрафиолетового излучения в спектре ртутных ламп делает их незаменимыми в ряде фотохимических процессов (например, получение витамина D_2 и др.), в медицине — для компенсации ультрафиолетового излучения при искусственном освещении. В сельском хозяйстве находят применение источники, выполняющие функции освещения, компенсации ультрафиолетового «голодания», а также обеззараживания среды. Создаются специальные лампы со спектром излучения, благоприятным для роста растений, что позволяет осуществлять не только «досветку» растений в период зимнего дня, но и полностью выращивать растения при искусственном свете.

С учетом направленности настоящего учебника многочисленные области науки и техники, в которых нашли применение разнообразные источники излучения, детально не рассматриваются. Укажем только, что существующие лампы позволяют успешно решать как специальные вопросы, в которых требуется максимальное приближение к характеристикам Солнца, например при имитации солнечного излучения, так и обеспечивать весьма сложные, часто противоречащие друг другу требования к параметрам ламп. Искусственные источники света позволяют получать единичные мощности до 100 кВт и более и на основе этого создавать печи для плавки материалов, достигать яркостей до 100 000 Мкд/м², используемых в скоростной киносъемке. Импульсные источники света обеспечивают осуществление импульсной световой локации, стереоскопического наблюдения, скоростной фотографии, передачи информации на значительные расстояния и т. п.

Глава семнадцатая

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

17.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА

Как уже отмечалось ранее, одними из главных параметров газоразрядных ламп, определяющих состояние частиц различного рода, являются температура разряда и ее распределение по сечению столба. При этом правильность результатов, получаемых на основе термической теории, зависит от степени приближения параметров разряда к локальному термодинамическому равновесию.

Рассмотрим условия, определяющие возможность применения термической теории. Основным требованием является условие равенства температур всех процессов и компонентов в изотермической плазме. При этом к изотермической плазме применимы также все другие понятия термодинамики (энтропия S, теплоемкость C и т. п.). Так как все компоненты плазмы (кроме фотонов) подчиняются принципам классической статистики, то функции распределения частиц также известны. Следующим требованием изотермичности плазмы является выполнение требования равновесия между каждым из прямых элементарных процессов и обратным ему процессом (излучение уравновешено поглощением, ионизация — рекомбинацией, возбуждение ударами частиц — неупругими ударами второго рода и т. д.). Полностью изотермическая плазма может длительно существовать только в условиях, обеспечивающих ее полную тепловую изоляцию от окружающего пространства. В реальных условиях происходит уменьшение температуры от центральных областей к периферийным, имеющим тепловой контакт со значительно более холодным окружающим пространством. Однако во многих практических случаях (для большинства газоразрядных ламп высокого давления), несмотря на наличие процессов переноса и обмена энергией, можно применять формулы, полученные для условий равновесия. При этом используют понятие локального значения температуры, характерное для данного объема плазмы. Чем дальше расположен этот объем от периферийных областей, тем ближе его состояние к равновесному. Свидетельством выполнения такого условия служит неравенство [21]

$$\lambda_i |\mathrm{grad} I| / I \ll 1, \qquad (17.1)$$

где λ_i — свободный пробег частиц, определяющих процесс; I — величина, изменение которой определяет скорость процесса данного вида переноса энергии (или массы).

Таким образом, процессами, нарушающими термодинамическое равновесие, являются такие процессы, при которых энергия рассматриваемой системы уменьшается или увеличивается. Смысл (17.1) заключается в том, что если эти процессы происходят значительно реже, чем процессы, связанные с обменом энергией, то отклонение от равновесия невелико. В этом случае правомочно использовать более упрощенный способ рассмотрения плазмы как квазитермической среды: тепловое равновесие с температурой T реализуется в каждой точке плазмы, при этом T является непрерывной функцией координат.

Рассмотрим более подробно названные выше условия, в первую очередь — равенство температур, определяющих разные процессы. В общем случае различают следующие условные температуры.

Температура газа тяжелых частиц $T_г$. При максвелловском распределении числа частиц по скоростям пользуются следующей функцией, в которой $T_г$ является важнейшим параметром, определяющим вид функции:

$$f_г(v) = 4\pi n_г m_г / 2\pi k T_г v^2 \exp(-m_г v^2 / 2kT_г), \qquad (17.2)$$

где $n_г$ — концентрация частиц, шт./см³; $m_г$ — масса частиц, г; v — скорость частиц, м/с; k — постоянная Больцмана.

Температура электронов T_e. Определяется соотношением, аналогичным (17.2), при $T_e = T_г$.

Температура заселения $T_в$, определяющая заселенность возбужденных уровней. Для термической плазмы правомочна формула Больцмана

$$n_k = n_0 g_k / g_0 \exp(-E_k / kT_в), \qquad (17.3)$$

где n_k — концентрация частиц с энергией E_k, шт./см³; n_0 — концентрация частиц в основном состоянии, шт./см³; g_k и g_0 — статистические веса k-го состояния и основного соответственно.

Температура распределения $T_р$, определяющая распределение заселенности по уровням. Для равновесной плазмы $T_в = T_р$.

Температура ионизации T_i, определяющая степень ионизации газа. При локальном термодинамическом равновесии x_e определяется по формуле

$$x^2_e/(1-x^2_e) = 2g_i/g_0 \cdot 2\pi m_e/h^3 \times$$

$$\times p^{-1}(kT_i)^{5/2} \exp(eU_i/kT_i), \qquad (17.4)$$

где $x_e = x_i = n_i/n_г$ — степень ионизации электронов и ионов; g_i и g_0 — статистические веса ионизованного и основного состояния; h — постоянная Планка; T_i — температура ионизации; U_i — потенциал ионизации; p — давление плазмы; m_e — масса электрона.

Для большинства стационарных газоразрядных ламп $x_e \ll 1$. Тогда (17.4) может быть упрощено:

$$x \approx 2g_i/g_0 \cdot 17{,}8 \cdot 10^2 p^{-1/2} T_i^{5/4} \exp(-5\,800 U_i/T_i), \qquad (17.5)$$

где p — давление Па; T_i — температура, К; U_i — потенциал ионизации, В.

В термодинамически равновесной плазме, характеризуемой температурой T,

$$T_г = T_e = T_в = T_р = T_i = T. \qquad (17.6)$$

Наиболее полно исследовано изменение T_e и $T_г$ при различных условиях разряда. В электрических дугах низкого давления $p \leqslant 10$ кПа и при малых разрядных токах $I < 0{,}1$ А плазма положительного столба в любых газах существенно неравновесна (т. е. $T_г \neq T_e$). При увеличении давления и тока возрастает число соударений между компонентами плазмы, значительно увеличивается обмен энергией между частицами, растет доля энергии, передаваемой электронами атомам газа, что сопровождается ростом температуры газа и снижением электронной температуры. Для давлений $p \geqslant 15$ кПа для ртути и $p \geqslant 8$ кПа для воздуха значения T_e и $T_г$ различаются мало. На рис. 17.1 приведена зависимость изменения температуры электронов и газа от давления.

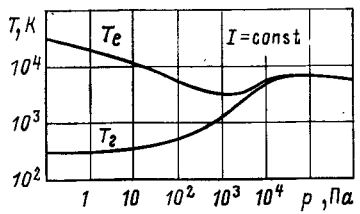


Рис. 17.1. Зависимость температуры электронов и газа от давления (схема)

Оценим степень выполнения (17.1) с точки зрения влияния на равновесие плазмы потерь энергии, связанных с излучением. Расчеты, определяющие число возникающих возбужденных и разрушающихся в единицу времени атомов, свидетельствуют, что равновесие между этими процессами наступает при концентрациях электронов $n_e \geqslant 10^{12}$ см⁻³. Данное условие для ртутных дуг, имеющих практическое применение, реализуется при концентрации нормальных атомов свыше $n_e \approx 10^{16}$ см⁻³, т. е. при $p \geqslant 10 \div 20$ кПа. При давлениях около 0,1 МПа и выше на 10^4—10^6 актов безызлучательного процесса разрушения возбужденного атома приходится один акт излучения, т. е. для давлений свыше 30—50 кПа правомочно применять понятие локального термодинамического равновесия (за исключением периферийных областей столба разряда).

В связи с наибольшим распространением источников света, работающих на переменном токе, следует особо остановиться на скорости установления равновесия различных процессов в плазме. Наиболее быстро следует за изменением подводимой энергии электронная составляющая плазмы. Равновесие для распределения энергии электронов устанавливается за время около 10^{-12} с. Время релаксации для процессов ионизации и возбуждения составляет около 10^{-8}—10^{-6} с. Наиболее медленно происходит обмен энергией между электронами и атомами, что определяет время выравнивания температур между ними. По оценкам значение этой величины для одноатомных газов и паров составляло 10^5 с. Из этого следует, что при работе источников света на частотах до 10^3 Гц квазистационарное состояние можно считать устанавливающимся в начальный момент.

Электрические характеристики плазмы. На основе зависимостей, указанных ранее, получим значения тока и проводимости для термической плазмы. Плотность тока определяется скоростью перемещения электронов и ионов под действием электрического поля в результате диффузии, обусловленной градиентом концентрации. Эти процессы описываются следующими уравнениями [5]:

$$J_e = en_e b_e E + eD_e \operatorname{grad} n_e \quad \text{и} \quad J_e = en_i b_i E - eD_i \operatorname{grad} n_i, \qquad (17.7)$$

где b_e и b_i — подвижности электронов и ионов; D_i и D_e — коэффициенты диффузии электронов и ионов; E — напряженность электрического поля.

Для дугового разряда можно пренебречь ионной составляющей тока, так как подвижность ионов как более тяжелых частиц значительно меньше подвижности электронов. Кроме того, вдоль оси положительного столба концентрация электронов и ионов постоянна, т. е. $\operatorname{grad} n_e = \operatorname{grad} n_i = 0$. Поэтому для осевой составляющей плотности тока

$$J = J_e + J_i = en_e b_e E. \qquad (17.8)$$

Величина $en_e b_e$, называемая удельной проводимостью плазмы σ, является одной из наиболее важных электрических характеристик

разряда. Выразим проводимость через основную характеристику разряда — температуру T. Подвижность электронов равна:

$$b_e = \frac{0{,}75e}{Q_e\sqrt{\frac{8}{\pi}m_e kT}}, \qquad (17.9)$$

где Q_e — эффективное сечение, характеризующее размер частиц при взаимодействии с электронами и равное сумме эффективных сечений рассеяния электронов на атомах n_0q_0 и на положительных ионах n_iq_i:

$$Q_e = n_0q_0 + n_iq_i. \qquad (17.10)$$

Обозначив $x = n_i/n_г$, где x — степень ионизации, и подставив (17.10) в (17.9), получим:

$$\sigma = \frac{0{,}75e^2}{\sqrt{\frac{8}{\pi}m_e kT}}\,\frac{x}{[(1-x)\,q_0 + xq_i]}. \qquad (17.11)$$

Как видно из (17.11), степень ионизации x влияет на σ в зависимости от соотношения q_0 и q_i. Значение q_0 сильно зависит от распределения электронов по скоростям (эффекта Рамзауэра). Как правило, $q_i > q_0$, в связи с чем возрастание степени ионизации сопровождается ростом эффективного сечения и уменьшением подвижности электронов. Из (17.11) следует также, что при малых степенях ионизации проводимость растет примерно пропорционально x. Далее, при увеличении x, все больше сказывается рассеяние на ионах, что замедляет рост x. В предельном случае, когда рассеяние на ионах

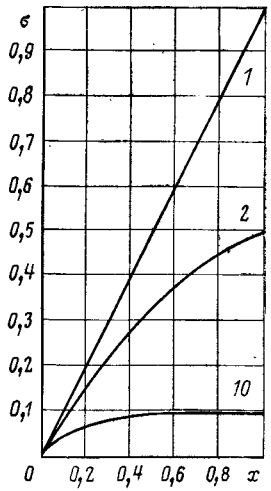


Рис. 17.2. Проводимость термической плазмы σ в зависимости от степени ионизации x для нескольких значений $q_i/q_г$

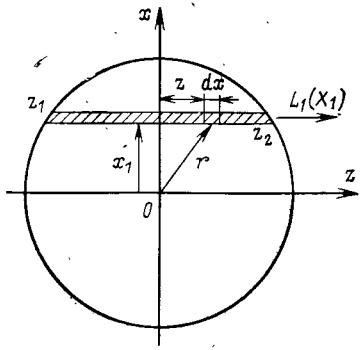


Рис. 17.3. Схема, поясняющая зависимость яркости в направлении, перпендикулярном оси разряда с цилиндрической симметрией

играет основную роль и проводимость не зависит от степени ионизации, получим [5]:

$$\sigma \approx \frac{e^2}{q_i\sqrt{\frac{8}{\pi}m_e kT}} \approx T^{3/2}. \qquad (17.12)$$

Ход удельной проводимости σ_1 для нескольких значений q_i/q_0 в зависимости от x приведен на рис. 17.2 [5]. Если σ не зависит от x, проводимость плазмы аналогична проводимости проводника с постоянным удельным сопротивлением. В этих случаях разряд должен иметь возрастающую вольт-амперную характеристику. На практике это имеет место в мощных разрядах, где степень ионизации близка к единице, а также в дугах с тяжелыми инертными газами, в которых благодаря выраженному эффекту Рамзауэра [5] значение q_i/q_0 велико.

Приведенные ранее зависимости позволяют на основе известных значений температуры и ее распределения по объему разряда определить плотность тока, а затем ток I:

$$I = \int_S J\,dS = E\int \sigma\,dS, \qquad (17.13)$$

где J — плотность тока, А/м²; S — поверхность, через которую протекает ток, м².

Для трубчатых ламп, обладающих цилиндрической симметрией,

$$I = \int_0^{r_{тр}} J(r)\,2\pi r\,dr, \qquad (17.14)$$

где $J(r)$ — плотность тока для значения радиуса r; r и $r_{тр}$ — текущее значение и радиус трубки соответственно.

Параметры энергии излучения плазмы. Важнейшими для источника света являются его светотехнические параметры. С целью получения конкретных значений яркости, размеров светящего тела, спектрального состава, потока излучения и светового потока подбираются и рассчитываются остальные параметры источника — электрические и конструктивные. Однако определение светотехнических параметров газоразрядных ламп представляет наиболее трудную задачу. В связи с этим рассмотрение вопроса начнем с наиболее простых случаев.

Излучение плазмы, образованной разрядом в атомарных газах и парах, состоит из слабого непрерывного фона и спектральных линий, характерных для данного вещества. Так как в суммарном потоке излучения лампы линии имеют больший удельный вес, начнем рассмотрение с них.

Больцмановский излучатель при отсутствии самопоглощения. Число актов спонтанного излучения, возникающих при переходе атома из возбужденного состояния k в состояние j, равно n_kA_{kj}, где A_{kj} — вероятность спонтанного перехода из состояния k в состояние j.

Умножив эту величину на энергию кванта с частотой ν_{kj}, получим объемную мощность излучения линии S_{kj}:

$$S_{kj}=h\nu_{kj}n_kA_{kj}. \qquad (17.15)$$

Поскольку концентрация возбужденных атомов n_k определяется по формуле Больцмана, то

$$S_{kj}=h\nu_{kj}A_{kj}\frac{g_k}{g_0}n_0\exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right). \qquad (17.16)$$

Наиболее распространенным в практике случаем является разряд с цилиндрической симметрией. Для этого случая (рис. 17.3) основные светотехнические величины запишутся следующим образом.

Энергетическая яркость спектральной линии:

$$L_{kj}(x)=\frac{1}{4\pi}h\nu_{kj}A_{kj}\frac{g_k}{g_0}\int_{z_1}^{z_2}n_0\exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right)dz. \qquad (17.17)$$

Удельная сила излучения в направлении, перпендикулярном к оси разряда (с учетом того, что $n_0=p/kT$):

$$I_{kj}=\frac{1}{4\pi}h\nu_{kj}A_{kj}\frac{g_k}{g_0}pk^{-1}\int_0^{r_{тр}}T^{-1}\exp\left(-\frac{eU_k}{kT}\right)2\pi r\,dr. \qquad (17.18)$$

Излучение сплошного (непрерывного) спектра разрядов высокой интенсивности возникает вследствие взаимодействия свободных электронов с положительными ионами, взаимодействия свободных электронов с нейтральными атомами, а также образования квазимолекул из частиц. Интенсивность для каждого из этих процессов пропорциональна соответственно n_en_i; $n_en_г$ и $n_г^2$. В теории непрерывных спектров [5] получена следующая формула для объемной мощности спектральной интенсивности излучения:

$$b_\nu=\frac{32\pi^2}{3\sqrt{3}}\frac{e^6\gamma^2}{(2\pi m_e)^{3/2}(kT)^{1/2}}n_en_i, \qquad (17.19)$$

где γ — коэффициент, учитывающий роль электронной оболочки иона; e — заряд электрона; m_e — масса электрона.

Соотношение интенсивностей линейчатого и сплошного спектров зависит от условий разряда и строения атома. Для элементов в основном I, II и частично III группы таблицы Д. И. Менделеева свойствен линейчатый спектр. У атомов с высокой мультиплетностью уровней, редких газов (кроме He), галогенов преобладает излучение непрерывного спектра.

Влияние поглощения в разряде на излучение спектральных линий. Рассмотрим его прежде всего для идеального случая — черного излучения. При постоянстве основных параметров вдоль направления из-

лучения можно получить выражение для энергетической яркости объема плазмы dv с учетом ослабления при прохождении через слои плазмы толщиной l:

$$dL_{kj}=\frac{h\nu}{4\pi}A_{kj}\frac{g_j}{g_0}n_0\exp(-eU_j/kT)\,[1-\exp(-K_{kj}l)]. \qquad (17.20)$$

При определенных упрощениях (рассматривается только один уровень возбуждения j и принимается $eU_j=h\nu$) (17.20) запишется как

$$dL_{kj}\approx\frac{h\nu^3}{c^2}\exp(-h\nu/kT)\,[1-\exp(-K_{kj}l)],$$

где c — скорость света.

Для равновесной концентрации атомов энергетическая яркость плазмы, рассчитанная по (17.20), соответствует яркости абсолютно черного тела, выражаемой формулой Вина, т. е. «черному» излучателю.

Рассмотренные два крайних случая больцмановского (прозрачного) излучателя и излучения черного тела не реализуются на практике полностью. В действительности температура и концентрация возбужденных атомов спадают к периферии разряда и коэффициент поглощения излучения $K_{k\gamma}$ является переменной величиной от длины волны излучения и температуры разряда.

Попытки получить аналитические выражения, учитывающие все эти обстоятельства, пока не дали положительных результатов.

Элементы расчета положительного столба разряда высокого давления. Как было показано выше, основным параметром дуги высокого давления, определяющим протекающие в ней процессы, является температура. Исходным для нахождения температуры и ее распределения по сечению разряда служит уравнение баланса энергии дуги.

С учетом некоторых упрощений можно принять, что электрическая мощность, выделяющаяся в дуге, отводится путем излучения и путем теплопроводности. Тогда выделяющаяся в объеме dV электрическая мощность равна:

$$dP=EJ\,dV=d\Phi_e+dP_т, \qquad (17.21)$$

где $d\Phi_e$ — мощность, отводимая излучением:

$$d\Phi_e=\Phi_{ev}\,dV, \qquad (17.22)$$

и $dP_т$ — мощность, отводимая теплопроводностью:

$$dP_т=-\mathrm{div}(\varkappa\,\mathrm{grad}\,T)dV, \qquad (17.23)$$

где $\varkappa$ — теплопроводность при температуре T.

Уравнение баланса

$$EJ\,dV=\Phi_e\,dV-\mathrm{div}(\varkappa\,\mathrm{grad}\,T)dV. \qquad (17.24)$$

Из (17.9)—(17.11) получим:

$$J=C_jp^{-1/2}T^{3/4}\exp(-eU_i/2kT)E. \qquad (17.25)$$

Тогда

$$EJ=C_jp^{-1/2}T^{3/4}\exp(-eU_i/2kT)E^2. \qquad (17.26)$$

Для определения потерь на излучение используют следующий удобный для проведения вычислений прием. Суммарная мощность излучения приравнивается к мощности фиктивного излучения со средним фиктивным потенциалом возбуждения $U_в$ (поглощением в этом случае пренебрегают):

$$\Phi_{ev} = h\nu_в A_в p (kT)^{-1} \exp(-eU_в/kT), \qquad (17.27)$$

или

$$\Phi_{ev} = C_\Phi p T^{-1} \exp(-eU_в/kT). \qquad (17.28)$$

Значение $U_в$, приведенное в (17.28), определяется для заданного типа разряда экспериментально.

В итоге получают дифференциальное уравнение, описывающее распределение температуры в столбе дуги:

$$C_j p^{-1/2} E^2 T^{3/4} \exp(-eU_i/kT) = C_\Phi p T^{-1} \exp(-eU_в/kT) - \operatorname{div}(\varkappa \operatorname{grad} T). \qquad (17.29)$$

Решение (17.29) возможно при известных постоянных, а также граничных условиях, связанных с характером занимаемого разрядом объема и формой разрядного канала. Кратко остановимся на этих характеристиках. При горении дуги в достаточно узкой и длинной трубке стенки ограничивают пространство, занимаемое дугой, и придают ей цилиндрическую симметрию. Такую дугу называют дугой, стабилизированной стенками. Граничные условия для нее имеют вид

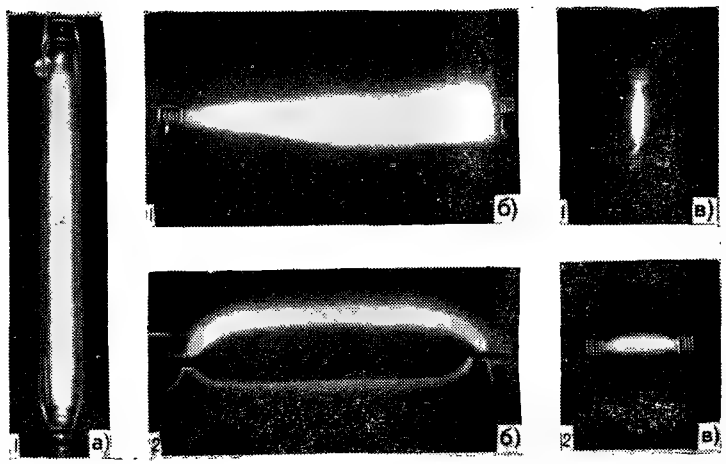


Рис. 17.4. Форма положительного столба дуги при различной стабилизации:

а — стенками; *б* — конвективными потоками (*1* — вертикальное положение горения; *2* — горизонтальное); *в* — электродами (*1* — вертикальное положение горения; *2* — горизонтальное)

$r = r_{тр}$, $T = T_{ст}$, где $T_{ст}$ — температура внутренней поверхности стенки трубки. Для свободногорящих дуг, дуг в шаровых колбах, диаметр которых сравним с расстоянием между электродами, и т. п. форма дуги не ограничивается стенками. В этих случаях передача теплоты в периферийной зоне осуществляется конвекционными потоками, которые играют роль воображаемых стенок колбы. Такие дуги получили название дуг, стабилизированных конвекцией. В лампах с малым расстоянием между электродами, которые играют роль теплоотводящих стенок, разряд стягивается у рабочих концов электродов в небольшие яркие пятна. Этот вид разрядов называется дугами, стабилизированными электродами. Рисунок 17.4 дает представление о разрядах с различными видами стабилизации при вертикальном и горизонтальном положениях горения.

Уравнение баланса энергии для столба дуги с цилиндрической симметрией. Оно записывается в виде

$$C_j p^{-1/2} E^2 T^{3/4} \exp(-eU_i/2kT)\, 2\pi r\, dr = C_\Phi p T^{-1} \exp(-eU_в/kT)\, 2\pi r\, dr - \frac{1}{r}\frac{d}{dr}(r\varkappa dT/dr)\, 2\pi r\, dr \qquad (17.30)$$

с граничными условиями

$$r = 0, \quad dT/dr = 0 \quad \text{и} \quad r = r_{тр}, \quad T = T_{ст} = \text{const}.$$

Решение (17.30) этого дифференциального уравнения невозможно без упрощения, в связи с чем прибегают к различным приемам. Основные из них: метод подобия, который позволяет получить ряд данных без интегрирования; приближенные методы решения, основанные на различных упрощениях; численное интегрирование. Коротко остановимся на этих методах.

Метод подобия. Подобными называют разряды, для которых применимо одинаковое уравнение баланса энергии; имеющие пропорциональные геометрические размеры; температуры которых в соответствующих точках равны. Для случая цилиндрической симметрии (17.30) описывает все разряды, при этом различаются лишь коэффициенты. Равенство температур сводится к равенству коэффициентов каждого слагаемого.

В результате можно записать:

$$r_{тр}^2 E^2 p^{-1/2} = \text{const I}; \qquad (17.31)$$

$$r_{тр}^2 p = \text{const II}. \qquad (17.32)$$

Введя соотношение между количеством пара (или газа), приходящегося на единицу длины разрядного промежутка m_1, и давлением p, из уравнения состояния идеального газа

$$p\, dv = kT\, dn_2$$

можно получить, как будет показано далее,

$$p = \gamma m_1 / r_{тр}^2. \qquad (17.33)$$

После подстановки (17.33) в (17.32) имеем:

$$\frac{r^2_{\text{тр}}E^2}{m_1^{1/2}} = \text{const}, \quad m_1 = \text{const}. \tag{17.34}$$

На рис. 17.5 приведены данные экспериментальной проверки соотношений (17.34) для ртутных дуг.

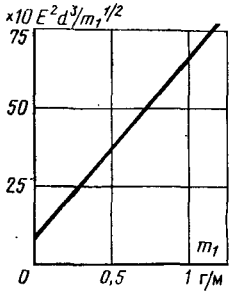


Рис. 17.5. Зависимость $E^2d^3/m^{1/2}_1$ от m_1 для цилиндрической ртутной дуги высокого давления

Развитие условий подобия приводит к равенству интегральных значений для удельных значений электрической мощности P_1, суммарного излучения Φ_1 и тепловых потерь $P_{\text{т}1}$.

После интегрирования (17.30) получим для подобных разрядов:

$$\frac{r^3_{\text{тр}}E^2}{m_1^{1/2}} D = m_1 A + B, \tag{17.35}$$

где D, A и B — коэффициенты, равные постоянным величинам, умноженным на соответствующие значения интегралов. Преобразуя (17.35), получаем:

$$r^3_{\text{тр}}E^2 = m_1^{3/2}A' + m_1^{1/2}B'. \tag{17.36}$$

Использование (17.36) значительно упрощает на практике получение числовых данных.

На рис. 17.6 приведена зависимость $Ed^{3/2}$ от удельной мощности P_1 при различных m_1 для ртутного разряда высокого давления.

Приближенный метод. Наиболее распространенным приближенным методом решения уравнения баланса является представление положительного столба в виде модели канала с постоянным значением температуры T по сечению канала с радиусом $r_{\text{к}}$ и теплоотводом с боковой поверхности канала. В этом случае все характеристики принимаются постоянными по сечению канала, поэтому

$$P_1 = EI = \int_0^{r_{\text{к}}} EJ \cdot 2\pi r\, dr = EJ\pi r^2_{\text{к}}; \tag{17.37}$$

$$\Phi_1 = \int_0^{r_{\text{к}}} \Phi_v 2\pi r\, dr = \Phi_V r^2_{\text{к}}; \tag{17.38}$$

$$P_{\text{т}1} = -\int_0^{r_{\text{к}}} \frac{d}{dr}\left(\varkappa r \frac{dT}{dr}\right) 2\pi\, dr = 2\pi r_{\text{к}} \varkappa\, \Delta T, \tag{17.39}$$

где ΔT — разность температур канала и стенки трубки.

Уравнение баланса мощности с единицы длины столба дуги:

$$EJ\pi r_{\text{к}}^2 = \Phi_v r_{\text{к}}^2 + 2\pi r_{\text{к}} \varkappa\, \Delta T. \tag{17.40}$$

Уравнения (17.37)—(17.40) связывают шесть неизвестных — p, P_1, T, E_0, $r_{\text{к}}$, ΔT. При расчетах обычно задаются значениями p и P_1 или I. Два других неизвестных определяют из экспериментальных данных или используя принцип минимума Штейнбека [25].

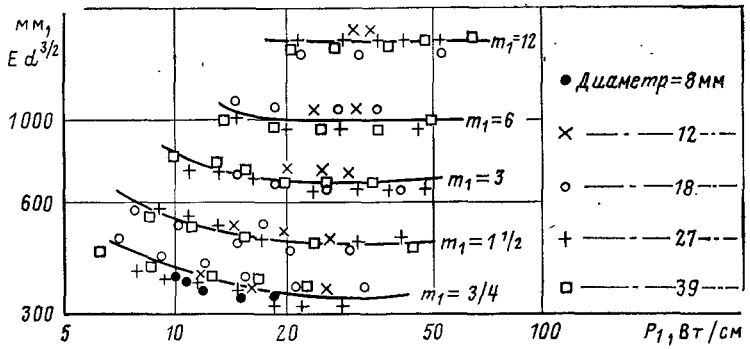


Рис. 17.6. Зависимость $Ed^{3/2}$ от P_1 при различных значениях m_1 для ртутного разряда высокого давления

Таким образом, получают:

$$P_1 = C_j p^{-1/2} E_1 \pi r^2_{\text{к}2} T^{3/4} \exp(-eU_i/2kT); \tag{17.41}$$

$$E = \frac{p^{1/4} P_1^{1/2} T^{-3/8}}{(C_j)^{1/2} (\pi r_{\text{к}2})^{1/2}} \exp(-eU_i/4kT). \tag{17.42}$$

Для упрощения вычислений необходимо исключить в (17.42) T из показателя экспоненты. Поэтому с учетом (17.28), (17.38) и уравнения баланса мощностей

$$P_1 = \Phi_1 + P_{\text{т}1} \tag{17.43}$$

(17.42) приводят к виду

$$E = c_1 p^{1/4 + U_i/4U_{\text{в}}} \frac{P_1^{1/2}}{(P_1 - P_{\text{т}1})^{U_i/4U_{\text{в}}}} (\pi r^2_{\text{к}2})^{U_i/4U_{\text{в}} - 1/2}, \tag{17.44}$$

где в константу c_1 входит кроме постоянных и значение $T^{-(3/8 + U_i/4U_{\text{в}})}$, которое также может быть принято постоянным.

Формула (17.44) имеет универсальный характер и оказывает значительную практическую помощь, несмотря на допущения, положенные в основу ее вывода. Заменив в (17.44) p на m_1 и приняв ΔT постоянным, получают:

$$r^{3/2}_{\text{тр}} E = c m_1^{1/4 + U_i/4U_{\text{в}}} \frac{P_1^{1/2}}{(P_1 - P_{\text{т}})^{U_i/4U_{\text{в}}}}. \tag{17.45}$$

Из (17.45) видно, что при постоянном P_1 значение $Er_{тр}^{3/2}$ в логарифмическом масштабе линейно связано с p. При этом, зная тангенс угла наклона φ прямой:

$$\operatorname{tg}\varphi = 1/4(1+U_i/U_в), \qquad (17.46)$$

можно экспериментально найти $U_в$.

Далее из (17.40), (17.45) и (17.46) получают значение температуры канала разряда, которая с некоторыми упрощениями представляется в виде

$$T \approx \frac{0{,}434e/kU_в}{\left(\lg c_1 - \lg\dfrac{P_1 - P_т}{m}\right)}. \qquad (17.47)$$

Из этой зависимости следует, что при постоянных давлении (m_1) и роде газа или пара температура разряда слабо возрастает при повышении удельной мощности P_1 (или тока I). Увеличение тепловых потерь $P_{т1}$ слабо понижает температуру разряда. Такой же эффект вызывает снижение потенциала возбуждения, скажем, за счет введения в разряд элементов с более низким значением $U_в$.

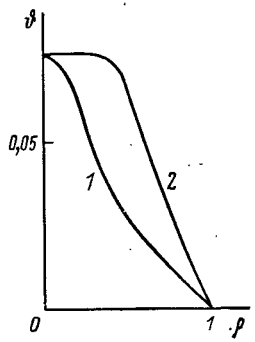


Рис. 17.7. Дуги с различным распределением температуры по сечению разряда: 1 — малые токи и удельные мощности; 2 — большие токи и удельные мощности

Численное решение уравнения баланса стало возможным благодаря развитию вычислительной техники. После введения переменной $Q = kT/eU_i$ уравнение баланса мощности (17.40) можно привести к виду

$$\frac{1}{\rho}\frac{d}{d\rho}\left(\rho\frac{dQ}{d\rho}\right) = K_2 f_2(Q) - K_1 f_1(Q). \qquad (17.48)$$

По результатам интегрирования (17.48) можно сделать следующие основные выводы:

1. Условия существования разряда требуют наличия минимального градиента положительного столба, приближенно равного:

$$E \geqslant \sqrt{cp/r_{тр}}. \qquad (17.49)$$

2. Для каждого конкретного значения $r_{тр}$, p и E возможны две формы существования разряда — с широким распределением температуры по сечению или сосредоточенным у оси трубки (рис. 17.7).

3. При постоянных p и $r_{тр}$, а также при малых токах разряд имеет падающую вольт-амперную характеристику. С увеличением тока градиент положительного столба проходит через минимум и начинает расти.

4. Градиент положительного столба слабо зависит от давления.

5. Температура на оси разряда тем выше, чем ниже давление (при I=const).

6. Увеличение теплоотвода от стенок лампы (уменьшение $T_{ст}$) при p=const, E=const, I=const и P_1=const приводит к увеличению температуры в центре разряда.

17.2. КОЛБЫ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Специфика работы электродов современных газоразрядных ламп высокого давления, а также характер наполнения (газ или пары различных соединений) вызывают необходимость изолировать объем, в котором происходит дуговой разряд, от окружающей среды. Для этого используется герметическая оболочка определенной формы, называемая колбой, имеющая оптически прозрачные элементы, позволяющие оптическому излучению выходить в окружающее пространство. Колба лампы прежде всего выполняет конструктивные функции: определяет расположение отдельных элементов лампы (электродов, вводов, соединительных элементов и т. п.), создает необходимую механическую прочность. Во многих случаях колба, например, придает за счет своей конфигурации газоразрядному промежутку определенные объем и форму, обеспечивает необходимый тепловой режим для создания заданного давления рабочего вещества разряда, придает потоку излучения требуемую пространственную структуру благодаря наличию оптических систем, выполняет некоторые функции светового прибора (покрытие части колбы отражающим или рассеивающим слоем), изменяет спектральный состав излучения. Кроме того, существует ряд источников света, имеющих колбу с газоразрядным промежутком, помещенную внутрь одной или нескольких наружных колб. В некоторых из таких ламп на внутреннюю поверхность наружной колбы наносится люминофорный слой, преобразующий излучение разряда в излучение требуемого спектрального диапазона.

К материалам колб газоразрядных ламп высокого давления предъявляется ряд требований — физических, химических, оптических, конструктивных, технологических и некоторых других. Основными из них являются следующие:

оптическая прозрачность в требуемой области спектра;

вакуумная герметичность как материала самой колбы, так и мест ее соединения с другими элементами;

газонепроницаемость в рабочем диапазоне;

термическая устойчивость при рабочих нагрузках во время эксплуатации;

химическая устойчивость к наполнению и окружающей среде;

отсутствие выделений, сильно изменяющих параметры материала, а также взаимодействующих с материалом колбы;

необходимая пластичность при изготовлении и сохранение приданной формы в рабочих условиях;

способность без деформаций выдерживать механические нагрузки в течение срока службы;

сохранение необходимой электроизоляционной прочности;

обеспечение возможности создавать вакуумно-плотные электропроводящие вводы сквозь стенку колбы;

удовлетворение требований технологичности при изготовлении;

достаточно низкая стоимость и др.

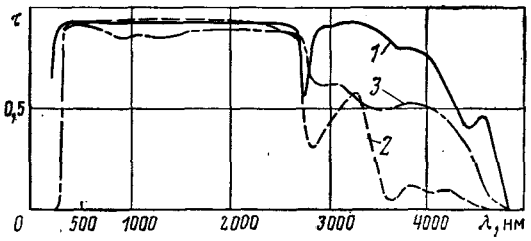


Рис. 17.8. Кривые пропускания наиболее распространенных марок стекол:

1 — кварцевое стекло; *2* — стекло С49-5К; *3* — стекло С90-1 (толщина 1 мм, t=20 °С)

Наиболее подходящим материалом, удовлетворяющим большинству из перечисленных требований, оказалось неорганическое силикатное стекло. В настоящее время выпускается много марок стекол, специально предназначенных для колб газоразрядных ламп. В качестве основного компонента в них используется окись кремния, содержание которой колеблется от 50 до 100 %. Кривые пропускания наиболее распространенных марок стекол приведены на рис. 17.8. Наибольшей областью пропускания (от 180 — 200 до 4,5 — 5,0 нм) обладает плавленая окись кремния высокой чистоты — кварцевое стекло. В силу целого ряда достоинств [высокая термостойкость — до 1000 °С, большая механическая прочность 70 — 120 МПа (700 — 1200 кгс/см²), малый температурный коэффициент расширения $6 \cdot 10^{-7}$ °С$^{-1}$] кварцевое стекло получило самое широкое распространение в производстве газоразрядных ламп высокого давления [27]. Меньше используются для этого типа ламп стекла пирекс и молибденовое стекло.

Колбы ламп имеют различную конфигурацию. Для разрядов с малым расстоянием между электродами колбе придают шаровую или достаточно близкую к ней форму. Лампы с большим расстоянием между электродами имеют трубчатые колбы. Основными конструктивными размерами колб, требующими расчета при конструировании, являются: диаметр колбы $d_к$ и толщина стенки $\Delta d_к$ в случае шаровой колбы; диаметр трубки $d_{тр}$, ее длина $l_{тр}$ и толщина стенки $\Delta d_{тр}$ в случае трубчатой колбы. При специальной форме колбы (спираль, зигзаг и др.) вводятся дополнительные конструктивные геометрические параметры. Максимальные размеры колб газоразрядных ламп определяются исходя из геометрических размеров разряда и допустимого температурного режима лампы. Наиболее важным параметром является температура колбы.

Тепловой расчет колбы основан на решении уравнения теплового баланса. Оно составляется при следующих допущениях: нагрев за счет электрической мощности разряда происходит только со стороны внутренней поверхности колбы, а охлаждение — путем теплопередачи в окружающее пространство только со стороны внешней поверхности; температура по поверхности колбы постоянна и ее градиент нормален по отношению к поверхности.

Тогда

$$Q = -\varkappa S \; dt/dr, \qquad (17.50)$$

где Q — тепловой поток через поверхность; $\varkappa$ — коэффициент теплопроводности; dt/dr — градиент температуры; S — площадь поверхности.

Обозначим температуру окружающей среды через t_0, индексом 1 будем сопровождать все величины, относящиеся к внутренней поверхности; 2 — к наружной.

Для трубчатой колбы

$$P_{тр1}/2\pi \ln r_2/r_1 = \int_{t_2}^{t_1} \varkappa \, dt, \qquad (17.51)$$

где $P_{тр1}$ — тепловой поток через поверхность единичной длины.

Для шаровой колбы

$$P_{т,ш}/4\pi(1/r_1 - 1/r_2) = \int_{t_2}^{t_1} \varkappa\, dt. \qquad (17.52)$$

Принимаем значение $\varkappa$ для средней температуры, равной $t_0 = (t_1 + t_2)/2$, пренебрегая зависимостью $\varkappa$ от температуры. По закону Ньютона [24] для трубчатой колбы

$$P_{тр1} = \alpha(t_2 - t_0)\, 2\pi r_2; \qquad (17.53)$$

для шаровой колбы

$$P_{т,ш} = \alpha(t_2 - t_0)\, 4\pi r^2_2, \qquad (17.54)$$

где α — полный коэффициент внешнего теплообмена поверхности колбы с окружающей средой.

Переходя к удельному тепловому потоку с единицы поверхности $q_т$, теряемому за счет теплопередачи в окружающую среду и путем излучения q_σ, получаем:

$$q = q_т + q_\sigma = \alpha(t_2 - t_0). \qquad (17.55)$$

Значение $q_т$, Вт/см², в случае работы лампы в воздухе при естественной конвекции можно определить исходя из соотношения

$$q_т \approx A d_2^{-0,25} \Delta t^{1,25}, \qquad (17.56)$$

где d_2 — внешний диаметр для шара, горизонтально расположенной трубки или высота охлаждаемого участка для вертикально расположенной трубки, см; $\Delta t = t_2 - t_0$; A — коэффициент, зависящий в основном от рода окружающего колбу газа и его давления. Значения коэффициента A приведены в табл. 17.1.

Таблица 17.1

Условия охлаждения	Значение A, 10^{-4}(Вт/см)$^{1,25}\cdot$К^{1,25}, для перепада температур Δt, К		
	0	100	200
Воздух	4,4	4,0	3,7
Азот	1,7	1,6	1,5

Значения $q_т$ при различных диаметрах колб в условиях охлаждения в воздухе при естественной конвекции приведены на рис. 17.9.

При наличии наружной колбы с газовым наполнением теплоотвод от горелки за счет теплопередачи может быть уменьшен, значение коэффициента A в (17.56) при этом рассчитывается в соответствии с [15].

Удельные тепловые потери за счет излучения составляют:

$$q_\sigma = \varepsilon_к \sigma_0 T^4_2 - \alpha_к E_e, \qquad (17.57)$$

где $\varepsilon_к$ — интегральный коэффициент излучения колбы при абсолютной температуре $T_2 = t_2 + 273$ К; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана; $\alpha_к$ — коэффициент поглощения излучения, падающего извне на колбу и создающего облученность E_e.

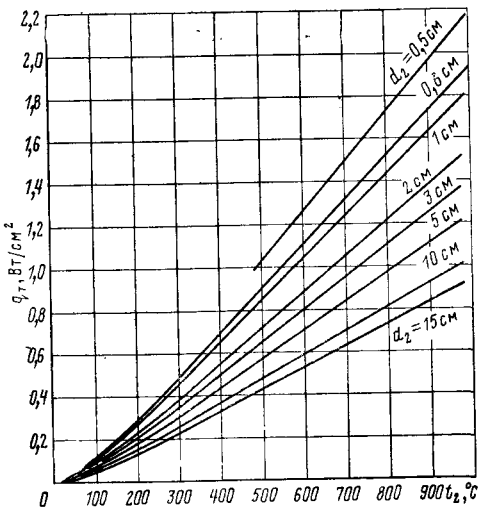


Рис. 17.9. Зависимость удельных тепловых потерь от температуры поверхности t_2 в условиях естественной конвекции для различных d_2 (окружающая температура 20 °С)

Принимая, что колба излучает только с поверхности и температура окружающей поверхности $S_{окр}$ равна T_0, получаем:

$$q_\sigma = \varepsilon_к \sigma_0 (T^4_2 - T^4_0). \qquad (17.58)$$

Значение интегрального коэффициента излучения промежутка $\varepsilon_{пр}$ равно:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_к} + \frac{S_к}{S_{окр}}\left(\frac{1}{\varepsilon_0} - 1\right)}, \qquad (17.59)$$

где ε_0 — интегральный коэффициент излучения окружающей поверхности $S_{окр}$.

Для большинства случаев $(S_к/S_{окр})\ (1/\varepsilon_0 - 1) \ll 1/\varepsilon_к$, тогда $\varepsilon_т \cong \varepsilon_к$ и $q_\sigma \approx \varepsilon_к \sigma_0 (T^4_2 - T^4_0)$.

Для облегчения использования (17.58) на рис. 17.10 приведены значения $\varepsilon_к$ и $\varepsilon_к \sigma T^4$ в зависимости от температуры кварцевого стекла.

Практическое определение размеров колбы обычно осуществляется при помощи расчета удельной электрической нагрузки на стенку колбы W_1:

$$W_1 = P_л / S_{1к}, \qquad (17.60)$$

где $S_{1к}$ — внутренняя поверхность колбы.

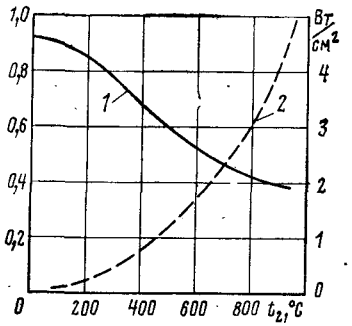


Рис. 17.10. Характеристики излучения в зависимости от температуры кварцевого стекла: 1 — $\varepsilon_{кв}$; 2 — $\varepsilon_{кв} \sigma_0 T^4$

Поскольку зависимость W_1 от температуры и характера ее распределения по колбе может быть определена только экспериментально для каждого конкретного типа источника света, рассмотрим тепловой баланс колбы и его связь с электрическими параметрами столба. Для ламп трубчатой формы введено понятие удельного теплового потока колбы, равного:

$$P_{т1} = \alpha P_1, \qquad (17.61)$$

где α — коэффициент, определяющий долю мощности, идущую на нагрев колбы; P_1 — удельная электрическая мощность столба, Вт/см.

Подставляя αP_1 в (17.51) и (17.52), получаем:

$$\frac{\alpha P_1}{2\pi\varkappa} \ln(r_2/r_1) = t_1 - t_2 \qquad (17.62)$$

и

$$\frac{\alpha P_1}{2\pi r_2} \frac{1}{\alpha} = t_2 - t_0. \qquad (17.63)$$

Из (17.62) и (17.63) находят значения r_1 и r_2.

Определенный интерес представляет рассмотрение двух предельных случаев: $(t_1 - t_2) \ll (t_2 - t_0)$, что соответствует условиям естественного охлаждения лампы, и $(t_1 - t_2) \gg (t_2 - t_0)$, что реализуется в случае водяного охлаждения ламп.

Разделив (17.62) на (17.63), получим выражение

$$\frac{(t_1 - t_2)}{(t_2 - t_0)} = \frac{\alpha r_2 \ln(r_2/r_1)}{\varkappa}, \qquad (17.64)$$

позволяющее оценить условия теплоотвода в обоих случаях.

Для первого случая имеем

$$\alpha P_1 = q_2 \cdot 2\pi r_2 \qquad (17.65)$$

и далее

$$r_2 = \frac{\alpha P_1}{2\pi\alpha (t_2 - t_0)}, \qquad (17.66)$$

что при замене $P_1 = k_л IE$ ($k_л$ — коэффициент, характеризующий сдвиг фазы между градиентом положительного столба E и током лампы I) дает:

$$r_2 = \frac{\alpha k_л}{2\pi\alpha (t_2 - t_0)} IE. \qquad (17.67)$$

Во втором случае получим зависимость

$$\ln(r_2/r_1) = \frac{\bar{\varkappa}(t_1 - t_2)\, 2\pi}{\alpha P_1}. \qquad (17.68)$$

В рассмотрении процесса теплоотвода не учитывался тепловой баланс приэлектродных областей лампы. В лампах с короткой дугой (шаровой или близкой к шаровой формы) выделить приэлектродные области затруднительно, в связи с чем для инженерных расчетов рассматривают тепловой баланс колбы в целом. В трубчатых лампах вводят специальные коэффициенты, определяемые экспериментальным путем, связывающие электрическую мощность столба с мощностью, выделяемой в электродных областях, и далее проводят расчет для всей колбы.

По определению величина α может быть выражена так:

$$\alpha = 1 - \Sigma\Phi / P_л, \qquad (17.69)$$

где $\Sigma\Phi$ — поток излучения разряда и электродов, вышедший за пределы колбы; $P_л$ — мощность лампы.

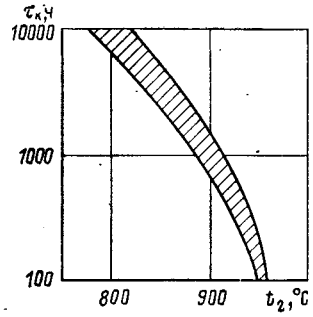
Таблица 17.2

Тип лампы и материал колбы	α
Ртутная высокого давления в трубчатой кварцевой колбе	$\alpha_{ст} \approx 0,28 + 7,2/P_1$
Ксеноновая высокого давления в трубчатой кварцевой колбе	$\alpha_{ст} \approx 0,35 + 30/P_1$
Ртутная шаровая в кварцевой колбе	$\alpha_к \approx 0,20 + 20/P_л$
Ксеноновая шаровая в кварцевой колбе	$\alpha_к \approx 0,75 - 0,016\eta_V$

Для аналитического определения $\Sigma\Phi/P_л$ необходимо проинтегрировать излучение по всему спектру с учетом отражения и поглощения колбы, что весьма затруднительно. Для газоразрядных ламп высокого давления

$$\alpha = 1 - \Phi/P = (1 - c) + b/P, \qquad (17.70)$$

где c и b — коэффициенты, определяемые экспериментально. Формулы для расчета α для разных типов ламп даны в табл. 17.2.



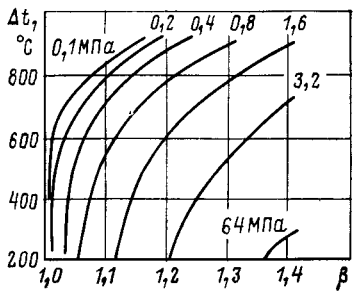


Рис. 17.11. Зависимость срока службы $\tau_к$ колб из кварцевого стекла от температуры

Рис. 17.12. Зависимость допустимого перепада температур Δt от давления внутри колбы для различных β

При определении геометрических размеров колбы, учитывая ее тепловой режим, для ламп с парами металлов и их соединений необходимо обеспечить температуру не ниже минимальной, соответствующей заданному давлению паров. Для ламп с газовым наполнением это условие не является необходимым. Однако в обоих случаях максимальная температура на колбе определяет срок службы ламп, который сильно уменьшается с ростом температуры кварцевой колбы. На рис. 17.11 приведена зависимость срока службы колб из кварцевого стекла от температуры.

Так как конфигурация горелок практически отличается от простых геометрических тел вращения (цилиндр и шар), температура по поверхности горелки неодинакова. Наличие тепловой конвекции и приэлектродных участков, изгибание разряда при горизонтальном горении дуги в трубчатой колбе приводят к местному превышению температуры, значение которого может достигать приблизительно 200 °С. Поэтому эффективная температура, используемая в расчетах, является некоторым усредненным значением, примерно равным для шаровых ламп

$$t_{2эфф} \leqslant t_{1max} - \Delta t_{эфф} - 50$$

и для трубчатых ламп

$$t_{2эфф} \leqslant t_{1max} - \Delta t_{эфф} - 100. \qquad (17.71)$$

Расчет колб ламп на механическую прочность должен проводиться с учетом напряжения от внутреннего избыточного давления и напряжения из-за перепада температур в стенке. Принимая отношение $r_2/r_1 = \beta$ для внешней поверхности цилиндрической колбы, можно определить напряжение от давления σ:

$$\sigma = 2p/(\beta^2 - 1), \qquad (17.72)$$

где p — избыточное внутреннее давление.

Тепловое напряжение при этом составляет:

$$\sigma_т = \frac{q_1 C}{2} r_2 \frac{1}{\beta} \left[\frac{\beta^2 - 1 - 2\ln\beta}{\beta^2 - 1} \right], \qquad (17.73)$$

где $q_1 = \frac{P_{т1}}{2\pi r_1}$.

Пренебрегая изменением плотности теплового потока по сечению тонкой стенки колбы (при $\beta \leqslant 1{,}4$ ошибка меньше 7 %), получаем:

$$q_1 = \frac{2\pi \Delta t \varkappa}{(\beta - 1)\, 2\pi r_1} = \frac{\Delta t \varkappa}{(\beta - 1)\, r_1}. \qquad (17.74)$$

Суммарное напряжение достигает своего максимального значения на внешней поверхности стенки колбы:

$$\sigma = \frac{2p}{\beta^2 - 1} + \frac{\Delta t \varkappa C}{(\beta - 1)\, 2} \left[\frac{\beta^2 - 1 - 2\ln\beta}{\beta^2 - 1} \right]. \qquad (17.75)$$

Его значение не должно превышать допустимого с учетом коэффициента запаса. Подставляя в (17.75) известные численные значения для кварцевого стекла [27], а также принимая $\sigma_{доп} = 200 \cdot 10^5$ Н/см² [27], получаем:

$$200 \cdot 10^5 - \frac{20p}{\beta^2 - 1} = 0{,}246 \frac{\Delta t}{\beta - 1} \left[\frac{\beta^2 - 1 - 2\ln\beta}{\beta^2 - 1} \right], \qquad (17.76)$$

где p — давление внутри колбы, МПа; $\Delta t = (t_2 - t_1)$ — перепад температуры в стекле колбы, °С.

На рис. 17.12 приведены зависимости допустимого перепада температур от давления внутри колбы и для раз-

личной толщины стенки $\beta = r_2/r_1$

$$\Delta t = \frac{P_{т1}}{2\pi\varkappa}\,\frac{\beta - 1}{r_2}. \qquad (17.77)$$

Тепловое напряжение (тангенциальная составляющая) достигает максимального значения на внешней поверхности колбы и определяется по формуле

$$\sigma_т = \frac{\alpha E}{8\pi\varkappa\,(1-\mu)}\,\frac{\beta^3 - 3\beta + 2}{\beta^3 - 1}\,\frac{P_{т1}}{r_2}. \qquad (17.78)$$

Механические тангенциальные напряжения на внешней поверхности для сферической толстостенной колбы с внутренним давлением p

$$\sigma_м = \frac{p}{\beta^3 + 1} + \frac{pr^3_2}{2r^3_2\,(\beta^3 - 1)} = \frac{3}{2}\,\frac{p}{\beta^3 - 1}. \qquad (17.79)$$

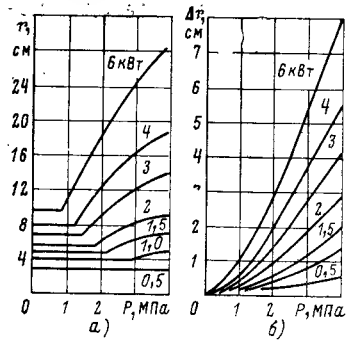


Рис. 17.13. Зависимость минимального радиуса колбы r от давления при различных значениях теплового потока P_{T1} (*а*); зависимость толщины стенки колбы Δr от давления при различных значениях теплового потока P_{T1} (*б*)

Сведя (17.74)—(17.79) в систему с учетом того, что $4\pi r^2_2 q \geqslant P_{т1}$ и $\sigma_g = \sigma_т + \sigma_м$, можно определить значения r_2 и $\beta = r_2/r_1$.

Результаты расчета минимального радиуса колбы r_1 для лампы, работающей в условиях естественного охлаждения в зависимости от давления p и теплового потока $P_{т1}$, попадающего на колбу, приведены на рис. 17.13,*а*, а зависимость толщины стенки колбы от давления и теплового потока $P_{т1}$ — на рис. 17.13,*б*.

17.3. НАПОЛНЕНИЕ КОЛБ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Как указывалось выше, газоразрядные источники света высокого давления имеют разнообразные спектральные характеристики, что связано с широкой гаммой веществ, используемых в качестве наполнения ламп. Несмотря на различие свойств этих веществ с точки зрения технологии введения в колбу лампы, их можно подразделить на две категории. К первой относятся газообразные вещества с заданным начальным давлением (так называемое холодное

давление), увеличивающимся после зажигания и разгорания лампы до рабочего давления. При этом соотношение холодного и рабочего давления определяется по известным закономерностям для «идеальных» газов. Второй категорией являются наполнения, имеющие при введении в лампу жидкое или твердое агрегатное состояние. Во время разгорания лампы по мере повышения температуры внутри колбы происходит испарение рабочего вещества, при этом в зависимости от дозировки и свойств вещества при рабочем режиме в колбе может или присутствовать часть неиспарившегося наполнения, или же все вещество может перейти в газообразную фазу.

Рассмотрим уравнение, позволяющее определить количество газа или пара в лампе.

Для стационарного режима в элементарном объеме лампы dV количество атомов вещества, находящегося в газообразной фазе dN, связано с давлением p и температурой T соотношением

$$p\,dv = dN\,kT. \qquad (17.80)$$

Общее количество атомов в колбе с объемом V получим интегрированием:

$$N = \int_V \frac{p\,dV}{kT}. \qquad (17.81)$$

Переходя к массе дозировки, получаем:

$$m = N\,\frac{M}{L} = \frac{M}{kL}\int \frac{p\,dV}{T}, \qquad (17.82)$$

где M — молекулярный (атомный) вес вещества; L — число Авогадро;

$$m = \frac{M}{R}\int \frac{p\,dV}{T}. \qquad (17.83)$$

Дальнейшие вычисления различаются для цилиндрической и шаровой колб.

Для случая цилиндрической колбы примем постоянным распределение температуры вдоль оси лампы, обозначим $\rho = r/r_1$, где r — текущий радиус, и $T/T_1 = c$, где T_1 — температура на оси колбы.

Для колбы с единичной длиной

$$m_1 = p\pi r^2_1\,\frac{M}{RT_1}\left(\frac{1}{\pi}\int_0^1\int_0^{2\pi}\frac{\rho\,d\rho\,d\varphi}{C}\right). \qquad (17.84)$$

Если обозначить

$$\gamma_{тр} = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\rho \, d\rho \, d\varphi}{C}, \qquad (17.85)$$

то (17.81) запишется как

$$m_1 = \frac{M}{R} \frac{\gamma_{тр}}{T_1} p (\pi r^2_1). \qquad (17.86)$$

С учетом областей за электродами колбы протяженностью Δl получим выражение для общей массы газа или пара:

$$m \approx m_1 l \, (1 + c \cdot 2 \, \Delta l / l), \qquad (17.87)$$

где l — расстояние между электродами; c в данном случае учитывает влияние на удельную дозировку m_1 заэлектродных зон. Так как обычно спад температуры в этих областях значительнее, чем от разряда к стенке колбы, то $c > 1$.

Для шаровой вертикально горящей лампы примем в качестве оси симметрии распределения температуры ось лампы, проходящую через электроды. Температура при этом является функцией координат ρ и ϑ, где ϑ — угол между осью лампы и заданным направлением. Влиянием электродов на распределение температуры пренебрегаем. Тогда масса газа или пара в объеме лампы

$$m = \frac{M}{RT_1} \left(\frac{4}{3} \pi r^3_1 \right) p \left(\frac{3}{2} \int_0^1 \int_0^{\pi} \frac{\rho^2 \, d\rho \sin \vartheta \, d\vartheta}{C} \right). \qquad (17.88)$$

Введя обозначение аналогично (17.85), получим:

$$m = \frac{M}{R} \frac{\gamma_{тр}}{T_1} p \left(\frac{4}{3} \pi r^3_1 \right). \qquad (17.89)$$

Значение $\gamma_{тр}$ можно определить исходя из экспериментальных данных или путем вычислений по известному распределению температуры. Наибольшее влияние на величину γ оказывают периферийные зоны, так как вблизи стенок колбы сосредоточена основная масса дозируемого газа; центральные части колбы вследствие малого объема и более высокой температуры вносят меньший вклад в значение γ.

При определении давления насыщенного пара вещества (т. е. при наличии жидкой или твердой фазы) используются экспериментальные зависимости давления паров от температуры. При этом для температуры принимают ее наименьшее значение на внутренней стенке колбы. При

наличии нескольких веществ в качестве наполнения применяют закон Дальтона, согласно которому давление в колбе лампы равно сумме давлений компонентов. Если дозируемые вещества могут образовывать амальгамы, необходимо учитывать, что давления компонентов при этом не обязательно равны давлениям для отдельных веществ.

17.4. ЭЛЕКТРОДЫ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ. БАЛАНС ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОДОВ. ТИПЫ ЭЛЕКТРОДОВ

Электроды являются одним из важнейших конструктивных элементов лампы. В газоразрядных лампах, работающих на переменном токе, каждый электрод попеременно в течение одного полупериода является катодом, а в течение следующего — анодом. В связи со значительным отличием физических явлений, происходящих на электроде в анодный и катодный полупериоды, а также из-за разницы тепловых, электрических и других режимов работы при конструировании электродов приходится принимать компромиссные решения.

Рассмотрим явления и баланс энергии на электроде в катодный и анодный полупериоды.

В результате процессов, происходящих на катоде, ток проходит из относительно холодного тела электрода в горячую плазму. Явление переноса при этом может осуществляться за счет электронов эмиссии, а также ионов, поступающих в катодную область со стороны положительного столба. У поверхности катода образуется слой нескомпенсированного пространственного заряда, обеспечивающего катодное падение потенциала $U_к$. Кроме того, имеется также переходная область между столбом и собственно катодной областью (зона контрактации), в которой происходит сужение токопроводящей зоны, что сопровождается ростом напряженности электрического поля по сравнению с градиентом потенциала в положительном столбе. В области катодного падения потенциала ускоряются ионы на пути к катоду и электроны, уходящие в сторону положительного столба. Ускоренные электроны могут приводить к усиленной, по сравнению со столбом, ионизации. Доля переносимого ионами тока в области катодного падения потенциала, как правило, больше, чем в положительном столбе.

Строение катодных областей дуг высокого давления бывает различным: наблюдаются три типа, отличающиеся характером прикатодных процессов. При не очень больших токах на тугоплавких катодах (например, на вольфраме)

образуется стационарное во времени и в пространстве ярко светящееся сужение токопроводящей зоны, примыкающей непосредственно к поверхности катода, — катодное пятно. Ко второму типу катодной области относятся разряды без катодного пятна. Обычно это бывает при увеличении тока до некоторого критического значения, при котором токопроводящая зона у катода скачком расширяется, катодное пятно исчезает, появляется темное пространство у катода, а температура самого катода возрастает. К третьему типу относятся дуги с сильно сжатым пятном, находящимся в быстром и, как правило, хаотическом движении по поверхности катода. Это имеет место для катодов из легкоплавких металлов (например, катод из жидкой ртути).

Рассмотрим баланс энергии на катоде. Ионы, попадающие на катод, приносят кинетическую энергию и энергию нейтрализации. Если нейтрализованные ионы (атомы) отражаются от катода, то кинетическая энергия и часть энергии нейтрализации могут идти на нагревание плазмы вблизи катода. Энергия поступает на катод из плазмы благодаря теплопроводности и излучению. Кроме того, на катоде выделяется джоулева теплота и энергия в результате химических реакций. Полученная катодом энергия компенсирует работу выхода электронов, теплота отводится за счет теплопроводности к более холодным частям, нагретые части катода излучают энергию в окружающее пространство. Часть энергии может расходоваться на испарение материала катода и диссоциацию молекулярных газов. Наиболее существенными для поддержания тока в дуге являются затраты энергии на работу выхода электронов из катода.

Таблица 17.3

Материал катода, наполнение	P, МПа	I, А	$U_к$, В	$J_к$, А/см²	$T_к$, К	Режим работы
Уголь, воздух	0,1	⩽40	5—13	100	3200	Без пятна
Вольфрам, ксенон	3	3—10	10—13	$(3\div7)\cdot10^4$	—	С пятном
Вольфрам, ксенон	—	—	—	$(1\div3)\cdot10^3$	3000	Без пятна

В табл. 17.3 приведены некоторые экспериментальные данные о параметрах катодных областей стационарных дуг.

Для описания процессов, происходящих на катоде, используется ряд теорий: термоэлектронной дуги, автоэлектронной дуги, переноса тока у катода положительными

ионами и др. Однако ряд явлений еще не получил окончательной трактовки, в связи с чем теоретические расчеты имеют в основном оценочный характер.

При положительном потенциале на электроде он выполняет функции анода. Если с электрода не происходит эмиссии положительных ионов (что справедливо для большинства ламп), то в непосредственной близости к нему ток переносится только электронами. Часто у анода образуется область отрицательного объемного заряда. В балансе электронов вблизи анода помимо элементарных процессов, имеющих место в столбе дуги, существен уход электронов на анод. Этот уход не полностью компенсируется приходящими из столба электронами, так как электроны переносят в столбе часть тока, а у анода — весь ток. Энергия, получаемая заряженными частицами от электрического поля в анодной области, тратится на ионизацию, излучение и теплоотвод как в радиальном направлении, так и в сторону анода. Значение напряженности электрического поля устанавливается таким, что компенсируются потери энергии и заряженных частиц. Анод нагревается излучением и потоками теплоты из плазмы, а также электронами, приносящими кинетическую энергию и энергию работ выхода. Из-за такого нагрева анод может интенсивно излучать. Наблюдаются даже процессы испарения и плавления анода. Так как в анодной области ток может быть контрагирован (обычно значительно меньше, чем у катодов), то выделяют область пространственного заряда с падением потенциала $U_а$ и переходную область от столба к области пространственного заряда.

Таблица 17.4

Материал анода, наполнение	P, МПа	I, А	$U_а$, В	$J_а$, А/см²	$T_а$, 10^3 К
Уголь, воздух	0,1	⩽40	20	40	4
Медь, аргон	0,1	100—500	1—5	200—1000	16—20
Вольфрам, ксенон	3	3—9	1	40—400	—

В табл. 17.4 приведены некоторые экспериментальные данные анодных областей стационарных дуг.

Общей теории анодных явлений пока не существует, разработаны лишь отдельные ее вопросы, в том числе теория ионизации у анода.

Наиболее распространенным типом электрода, применяемого в газоразрядных лампах высокого давления, явля-

ется накаленный катод, работающий при низком катодном падении потенциала (приблизительно равном потенциалу ионизации наполнения лампы). Несмотря на то что даже для ламп одного типа, но разной мощности электроды отличаются не только геометрическими размерами, но могут иметь существенные особенности, их можно сгруппировать в несколько типов. Наибольшее распространение получили электроды, изготавливаемые из вольфрама различного состава (чистого — ВЧ, с присадкой тория — ВТ и некото-

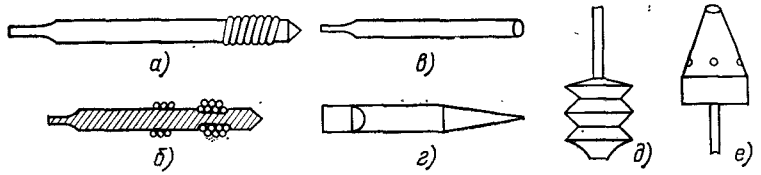


Рис. 17.14. Схемы электродов газоразрядных ламп различного типа:
а — с активированной спиралью; *б* — с активированной спиралью и зажигающей спиралью; *в* — из чистого вольфрама; *г* — из торированного вольфрама; *д* — анод с ребрами для увеличения поверхности излучения; *е* — катод с полостью с запасом активатора

рых других). Конструктивно этот тип электрода представляет собой стержень, на который надета спираль, свитая из проволоки меньшего диаметра. Конец стержня, выступающий за торец спирали, предназначен для формирования катодного пятна. В полостях между спиралью и стержнем размещается запас активатора. Электроды этой конструкции используются в двух вариантах: с активатором в виде порошка окиси тория и с активатором — окисью бария. Во время работы лампы вещество активатора образует пленку на поверхности катода, которая значительно снижает работу выхода электронов. Схема исполнения катода показана на рис. 17.14,*а*. В некоторых модификациях за основной спиралью размещается еще одна, содержащая дополнительный активатор, облегчающий зажигание лампы. Так как для этого необходим материал с малой работой выхода, а при этом, как правило, он имеет низкую температуру испарения, его удаляют от наиболее нагретых частей катода (рис. 17.14,*б*). Кроме описанных (так называемых пленочных) катодов распространение получили катоды из стержней чистого вольфрама, работающих в режиме оплавленного конца (рис. 17.14,*в*), и изготовленные из прутков торированного вольфрама различной формы. Эти электроды нашли наибольшее распространение в ксеноновых лампах (рис. 17.14,*г*, *д*, *е*). Для катодов ламп спе-

циального назначения используются различные материалы (например, импрегнированные катоды для импульсных ламп, представляющие собой губчатый спеченный вольфрам, содержащий в порах какой-либо активатор).

17.5. ВВОДЫ, ИХ ТИПЫ И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Токоподвод к электродам, находящимся внутри колбы, осуществляется специальным конструктивным элементом — вводом. Ввод должен отвечать следующим основным требованиям: обеспечивать вакуумную плотность лампы при любых температурах (как во время изготовления лампы, так и во время работы в течение срока службы), обладать достаточной механической прочностью, быть простым с точки зрения технологических и конструктивных требований.

Различают два типа вводов (впаев специально подобранного металла в стекло) — разборные и неразборные, причем последние являются наиболее распространенными. По значениям коэффициентов теплового расширения стек-

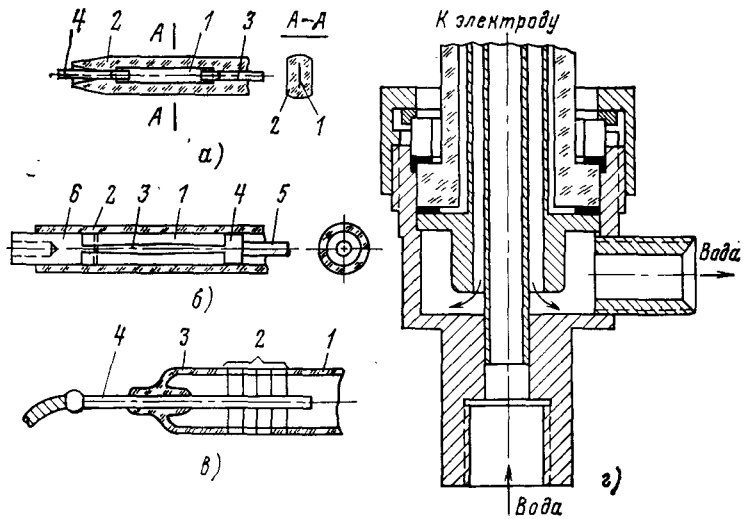


Рис. 17.15. Вводы в кварцевое стекло:
а — плоской молибденовой фольгой (*1* — фольга; *2* — кварцевая трубка; *3*, *4* — молибденовые стержни); *б* — цилиндрический фольговый (*1* — молибденовая фольга; *2* — кварцевая трубка; *3* — кварцевый вкладыш; *4* — муфта электрода; *5* — электрод; *6* — вывод); *в* — на переходных стеклах (*1* — кварцевая трубка; *2* — переходные стекла; *3* — молибденовое стекло; *4* — молибденовый вывод); *г* — разборный, с водяным охлаждением

ла и материала ввода различают так называемые согласованные и несогласованные впаи. Согласованными называются впаи, у которых значения коэффициентов теплового расширения материала ввода и стекла совпадают в требуемом диапазоне температур (допускается отличие значений не более чем на 10—15 %). Для увеличения надежности впая коэффициент расширения металла выбирают обычно несколько меньше, чем у стекла. Существуют несколько типов стекол для впаев, которые подразделяются по признаку материала ввода (например, молибденовые стекла — для вводов из молибдена, вольфрамовые стекла — для вводов из вольфрама). Для впаев в обычное стекло используется специальный сплав металла — платинит. Несогласованными называют впаи, у которых коэффициенты расширения материала колбы и металла отличаются более чем на 10—15 %. В этом случае вакуумная плотность и механическая прочность впая в диапазоне рабочих температур обеспечиваются за счет сил смачивания поверхности впая материалом колбы. Примером несогласованного впая являются фольговые вводы в кварцевое стекло (рис. 17.15,*а*, *б*).

Параметры вводов определяют исходя из теплового режима при рабочих условиях и конструктивных и технологических соображений. Рассмотрим расчет теплового режима ввода на примере наиболее распространенного в лампах высокого давления фольгового ввода в кварцевое стекло.

Нагрев ввода происходит в результате протекания тока и поступления части мощности от электрода. Передачей теплоты от колбы по кварцу пренебрегаем. Охлаждение ввода происходит путем теплопередачи с боковой поверхности кварцевой колбы в окружающую среду и теплопроводности вдоль ввода по кварцу и фольге к вводу. Мощность, подводимая током к фольговому вводу единичной длины (считаем ввод достаточно длинным), равна мощности, теряемой с боковой поверхности:

$$\frac{I^2\rho_м}{S_ф} = qS_{1кв}, \qquad (17.90)$$

где I — ток; $\rho_м$ — удельное сопротивление молибденовой фольги при рабочей температуре; $S_ф$ — площадь поперечного сечения фольги; $S_{1кв}$ — площадь боковой поверхности кварцевого ввода единичной длины; q — удельные потери мощности с боковой поверхности кварца.

Подставляя ранее полученное выражение для q, получаем значение рабочей температуры кварца в районе

ввода:

$$t_{кв} = \frac{I^2\rho_м}{\alpha S_ф S_{1кв}} + t_0, \qquad (17.91)$$

где α — коэффициент теплообмена ввода с окружающей средой.

Для случая цилиндрического ввода с учетом перепада температур в кварце получим:

$$t_ф = \frac{I^2\rho_м}{S_ф S_{1кв}\alpha}\left(1 + \frac{\alpha}{\varkappa_{кв}} r_{кв} \ln\frac{r_{кв}}{r_ф}\right) + t_0, \qquad (17.92)$$

где $\varkappa_{кв}$ — коэффициент теплопроводности кварца.

При расчете ввода требуется определить следующие параметры: толщину фольги δ, ее ширину b и радиус ввода $r_{кв}$. Так как фольга окисляется на воздухе при температуре свыше 250—300 °С, то этим значением ограничивается допустимая температура. Надежный впай из молибденовой фольги получается при толщине не более 20—28 мкм, что определяет значение δ. Для цилиндрических вводов с переходным стеклом $\delta = 50 \div 80$ мкм.

Для цилиндрических вводов

$$b = \Psi \cdot 2\pi r_ф, \qquad (17.93)$$

где Ψ — часть окружности радиусом $r_ф$, занимаемая фольгой ($\Psi = 0{,}9$).

Толщину стенки $\Delta = r_{кв} - r_ф$ выбирают в диапазоне 1,5—3 мм по технологическим соображениям, тогда

$$b = 2\pi r_{кв}\Psi(1 - \Delta/r_{кв}). \qquad (17.94)$$

Подставляя $r_{кв}$ из (17.92) в (17.91), получаем:

$$I^2 = \alpha \frac{4\pi^2 r^2_{кв}\delta\Psi\,(1 - \Delta/r_{кв})}{\rho_м\left[1 + \frac{\alpha}{\varkappa_{кв}} r_{кв} \ln \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta}{r_{кв}}\right)}\right]}(t_ф - t_0). \qquad (17.95)$$

Это соотношение можно решить графически относительно $r_{кв}$ и далее определить b.

В первом приближении можно считать, что

$$r_{кв} \sim I(\Delta t_ф)^{-1/2}. \qquad (17.96)$$

Значение температуры нагрева ввода электродом находят из решения уравнения теплового баланса электрода. Для стационарного случая температурное распределение электрода описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial t}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0, \qquad (17.97)$$

Его решение записывается через специальные функции. Если пренебречь малым перепадом температур в кварце, то распределение температуры $t(x)$ примет вид:

$$t(x) \approx ce^{-\lambda x}, \qquad (17.98)$$

где c — коэффициент пропорциональности; λ — параметр, определяющий характер спада температуры и зависящий, в частности, от конструкции ввода и его теплопроводности в месте соединения с кварцевым стеклом.

Учет теплоты, поступающий к вводу от электрода, производится только для случая очень коротких электродов. Тогда распределение температуры t по вводу с учетом (17.91) и поступающей от электрода теплоты будет равно:

$$t(x) \cong ce^{-\lambda x} + \frac{I^2\rho_м}{\alpha S_ф S_{1кв}} + t. \qquad (17.99)$$

Для кварцевого стекла используются следующие типы вакуумно-плотных вводов: фольговые, вводы на переходных стеклах, колпачковые, разборные. Фольговый ввод представляет собой полоску молибденовой фольги толщиной 20—28 мк, которая к краям уменьшается (рис. 17.15,*а*). Фольговый ввод применяется при токах 8—10 А, при больших токовых нагрузках (до 100 А) используются цилиндрические фольговые вводы (рис. 17.15,*б*). Во вводах на переходных стеклах применяются несколько марок стекла с постепенно увеличивающимися коэффициентами расширения. За счет этого осуществляется переход от кварцевого стекла к вольфрамовому или молибденовому. На рис. 17.15,*в* приведена схема такого ввода. Для мощных ламп применяются разборные вводы, в которых вакуумное уплотнение осуществляется за счет специальных водоохлаждаемых прокладок (рис. 17.15,*г*).

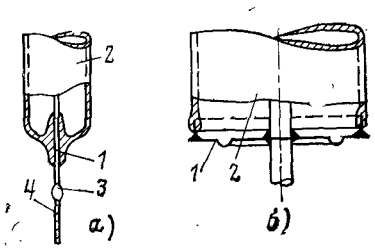


Рис. 17.16. Вводы в стекло:
а — одиночный ввод в молибденовое стекло (*1* — молибденовая проволока; *2* — стеклянная трубка; *3* — пайка латунью; *4* — медный канатик); *б* — рантовый спай ковара со стеклом (*1* — коваровое донышко с выводом и электродом; *2* — стеклянная трубка)

Кроме фольгового ввода впаи стекла (кроме кварцевого) бывают ножечными и рантовыми (рис. 17.16). Чаще всего применяются плоские штампованные ножки гребешкового или кольцевого типов.

Глава восемнадцатая

РТУТНЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ртутные лампы высокого и сверхвысокого давления наиболее распространены. Это связано с возможностью получения с их помощью излучения в разных диапазонах спектра — от ультрафиолетового до инфракрасного, с высокой упругостью паров ртути, позволяющей технологически просто создавать лампы с давлениями от сотен паскалей до десятков мегапаскалей; кроме того, пары ртути практически не взаимодействуют с материалами колбы и электродов. Эти лампы отличаются высокой плотностью излучения, в связи с чем их часто называют лампами высокой интенсивности.

18.1. РТУТНЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЛАМП С ЕСТЕСТВЕННЫМ И ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Ртутные лампы высокого давления подразделяют по форме колб и дуги на трубчатые, имеющие расстояние между электродами во много раз большее, чем диаметр колбы, и шаровые — с относительно короткой дугой. По принципу охлаждения их можно разделить на лампы с естественным и принудительным (чаще всего водяным) охлаждением.

Лампы высокого давления используются в осветительных и облучательных установках как эффективные источники, создающие значительные потоки излучения.

Для примера на рис. 18.1 приведено спектральное распределение энергии для ртутного разряда высокого давления.

Так как ртуть является легко испаряемым металлом, то при работе лампы даже незначительное изменение температуры колбы вызывает резкое изменение давления и плотности пара (рис. 18.2) и, как следствие, изменение параметров лампы. Для уменьшения этого эффекта ртутные лампы, как правило, наполняются дозированным количеством ртути так, чтобы в рабочих условиях вся ртуть полностью испарилась и лампа работала при ненасыщенных парах. При этом изменение давления происходит пропорционально изменению эффективной температуры колбы.

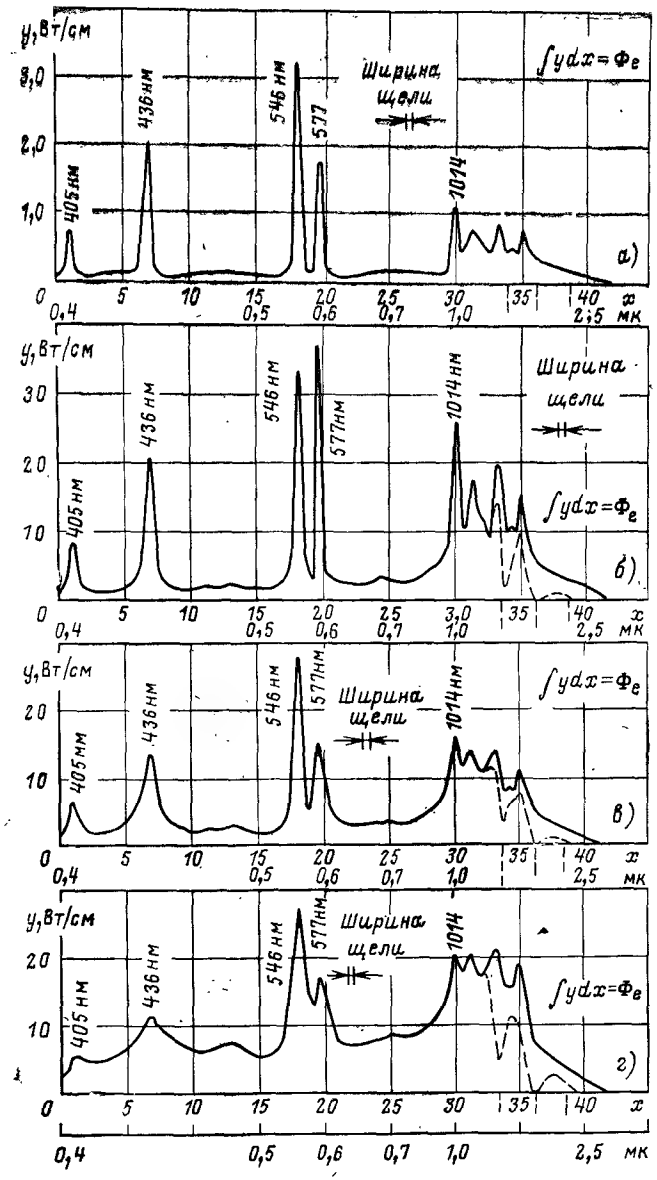


Рис. 18.1. Спектральное распределение энергии при различных условиях разряда в ртути:
давление, МПа: *а* — 25; *б* — 30; *в* — 100; *г* — 150

Градиент потенциала ртутного разряда высокого давления измерен для широкого диапазаона изменения параметров лампы. Для расчетов трубчатых ламп удобно ипользовать полученные на основании результатов измерений эмпирические формулы:

$$E \approx C_1 p^{0,55} d_1^{-0,25} I^{0,2}, \qquad (18.1а)$$

где $C_1 = 45,8$ В·А^{0,2}/см^{0,25}·Па^{0,55}; p — давление, МПа; d_1 — внутренний диаметр, см; I — ток лампы, А;

$$E \approx C_2 p^{0,75} d^{-0,33} P_{1\,ст}, \qquad (18.1б)$$

где $P_{1\,ст}$ — удельная мощность столба разряда, Вт/см; $C_2 = 111,4$ В·Вт^{0,2}/см^{0,97}·Па^{0,75}.

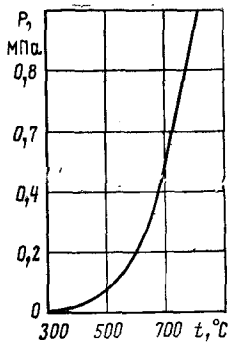


Рис. 18.2. Зависимость давления для насыщенных паров ртути от температуры жидкой фазы

Значение E, полученное по (18.1), определяется с точностью ±(10—15 %) при изменении p от 0,05 до 1,5 МПа, d_1 — от 0,6 до 3 см; I — от 0,5 до 5 А и P_1 — от 30 до 100 Вт/см, что соответствует наиболее распространенным для ламп условиям разряда (при естественном охлаждении).

Для шаровых ламп с короткой дугой ($2 \leqslant l_{эл} \leqslant 10$ мм) правомочна следующая зависимость:

$$E \approx 72,4\, p^{2/3}, \qquad (18.2)$$

где $1 \leqslant p < 10$ МПа.

Для капиллярных ламп с водяным охлаждением получена формула

$$E \approx 2,8\, p + 100. \qquad (18.3)$$

Напряжение на лампе складывается из падения напряжения в столбе $E\, l_{ст}$ и анодно-катодного падения потенциала $U_{а,к}$. Для ртутных дуг высокого и сверхвысокого давления $U_{а,к}$ мало зависит от условий разряда и находится в пределах от 12 до 18 В.

Удельная мощность суммарного излучения столба трубчатых ламп является приблизительно линейной функцией удельной мощности столба и не зависит от давления и диаметра колбы:

$$\Phi_1 \approx 0,72 (P_1 - 10), \qquad (18.4)$$

где $20 \leqslant P_1 \leqslant 100$ Вт/см при $pd_1 > 1$ МПа·мм.

Для КПД суммарного излучения из (18.4) получим:

$$\eta_e \approx 0,72 - 7,2/P_1. \qquad (18.5)$$

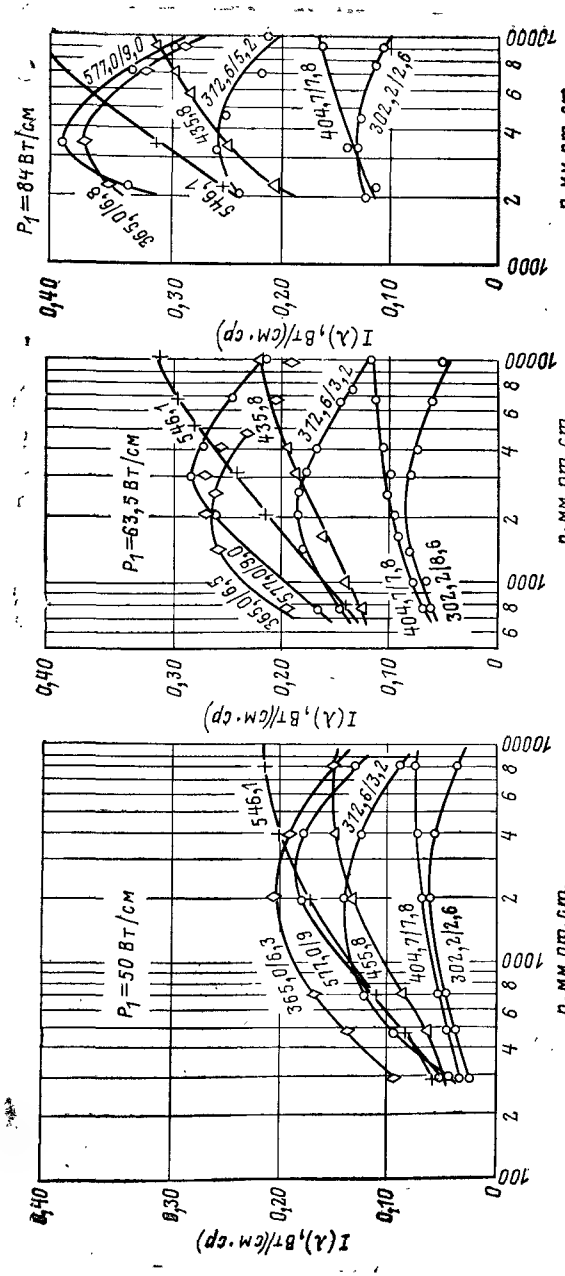


Рис. 18.3. Удельная сила излучения наиболее интенсивных линий в столбе ртутного разряда трубчатых ламп (d=16 мм)

Доля мощности столба, идущая на нагрев кварцевой трубки,

$$\alpha = 1 - \eta_e \approx 0{,}28 + 7{,}2/P_1. \qquad (18.6)$$

Распределение суммарного излучения Φ_1 по отдельным линиям зависит от условий разряда, и для него пока еще не найдено аналитическое выражение. Обычно спектральные характеристики разряда получают экспериментально. На рис. 18.3 приведены значения удельной силы излучения наиболее интенсивных линий в столбе ртутного разряда (для трубчатых ламп).

Рассмотрим последовательность расчета ртутных трубчатых ламп высокого давления с естественным охлаждением. Из данных рис. 18.3 можно сделать вывод, что для увеличения КПД в видимой части спектра давление паров ртути следует повышать до 0,5—1,0 МПа и увеличивать диаметр колбы, а для получения максимального КПД в ультрафиолетовой части нужно выбирать меньшие давления. Как правило, исходными данными для расчета лампы являются ее мощность, питающее напряжение, а также требования к условиям охлаждения. В зависимости от назначения лампы выбирается давление паров ртути. По значению питающего напряжения сети U_c и отношению $U_л/U_c$ находится напряжение на лампе. По заданному давлению ртути (см. рис. 18.2) получают необходимую минимальную температуру стенки колбы t_{min}. По предполагаемому сроку службы с учетом t_{min} выбирают значение рабочей температуры на колбе $t_{раб}$ ($t_{раб} > t_{min}$). Далее по графикам, приведенным на рис. 17.13,*а*, определяют радиус колбы, а затем — по известным давлению и радиусу — значение градиента потенциала в положительном столбе по (18.1). По напряжению на лампе и градиенту потенциала с учетом анодно-катодного падения рассчитывается расстояние между электродами. Расчет завершается проверкой механической прочности (определяется толщина стенки), а также выполнения условия стабильности горения дуги. По рассчитанным значениям удельной мощности столба определяются КПД разряда и лампы и по кривым рис. 18.3 — сила излучения отдельных линий разряда. Дозировка ртути определяется по приведенным ранее формулам, исходя из давления паров ртути и геометрических размеров колбы. Электроды выбираются с учетом условий подобия по отношению к уже проверенным на практике конструкциям.

Проиллюстрируем последовательность расчета на примере. Дано: $P_л$=400 Вт; $U_л = 0{,}65\,U_c = 0{,}65 \cdot 220 = 130$ В.

Исходя из требования создать лампу с максимальным КПД в ультрафиолетовой части спектра, давление паров ртути примем $p_л \simeq 0{,}2$ МПа. Охлаждение лампы естественное при $t_0 = 20$ °С. Ток лампы $I = P_л/(k_л U_л) = 400/0{,}9 \times \times 130 \simeq 3{,}42$ А.

По заданному давлению $p_л = 0{,}2$ МПа и зависимости давления паров ртути от температуры (см. рис. 18.2) находим значение минимально допустимой температуры на внутренней поверхности колбы: $t_{min} = 405$ °С. Примем с запасом $t_{min} = 405 + 45 = 450$ °С. Учитывая неравномерность распределения температуры на колбе из-за отличия формы колбы от цилиндрической в заэлектродных областях, примем $t_{1\,max} = t_{1\,min} + (100 \div 200) \simeq 550 \div 650$ °С. Для такой рабочей температуры в качестве материала колбы предпочтительно применять кварцевое стекло. Задаваясь необходимым сроком службы лампы (например, 10^4 ч), получаем значение $t_{2\,эфф} \simeq 750$ °С. Воспользовавшись уравнением $\alpha_{ст} k_л I E = q_2 2\pi r$ и данными табл. 17.2 и (17.56) для $\alpha_{ст}$, определим графически значение r_2. Левая и правая части уравнения рассчитываются как функции r_2, и точка пересечения определяет значение r_2 для данной температуры $t_{2\,эфф}$. Учитывая, что $r_2 = r_1 + \delta$, где δ по технологическим соображениям примем 0,25 см, находим r_1. Расстояние между электродами l равно:

$$l = \frac{U_1 - U_{а,к}}{E(d)} \approx 115/E(d).$$

Воспользовавшись (18.1), получим:

$$U_л - U_{а,к}/l \approx 1.$$

Вторым уравнением, позволяющим определить l и d, является уравнение

$$0{,}28\, P_1/l \approx A d_2^{0,75}\, \pi \Delta t^{1,25} + \varepsilon_{пр}\, \sigma_0\, d_2\, \pi\, T_4^0 - 7{,}2/l_{ст}.$$

Далее следует проверить требования механической прочности, учитывая, что

$$p_{доп} d \leqslant 2\delta \left[\sigma_{доп} - q_1 \left(\frac{\sigma}{q_1}\right) c\right].$$

Принимая $\sigma_{доп} = 150 \cdot 10^5$ Н/см², получим $p_{доп} d \leqslant 300\ \delta$. Условие стабильного горения дуги

$$m_1 \leqslant 30\ d_1^{0,5};$$

если заменить $m_1 \approx 0{,}7\ p\, d_1^2$, то получим:

$$p d_1^{3/2} \leqslant 4{,}5 \text{ МПа},$$

где p — Па, d_1 — см.

Далее по формулам определяют массу ртути и размеры фольгового ввода.

Потребность в источниках излучения большой мощности ограниченных размеров с высоким КПД привела к появлению ртутных ламп с принудительным водяным охлаждением. При больших удельных мощностях суммарное излучение столба

$$\Phi_1 \approx 0{,}7\ P_1; \qquad (18.7)$$

$$\eta_{ст} \approx 0{,}7; \quad \alpha_{ст} \approx 0{,}3.$$

Наиболее важным параметром ламп этого типа является яркость L, связанная с P_1, E и d_2 эмпирической формулой

$$L \approx 3{,}4\, \frac{P_1 (E + 77)}{\alpha_1^{0,76}}\, 10^3, \qquad (18.8)$$

где L — кд/м²; P_1 — Вт/см; E — В/см; d_1 — мм.

Формула (18.8) применима с точностью 10—15% в диапазонах значений P_1 от 100 до 600 Вт/см; E — от 100 до 400 В/см и d_1 — от 1 до 4 мм.

Так как в лампах с водяным охлаждением повышение яркости связано со значительным повышением мощности и давления, то при расчете особое значение приобретает определение допустимой рабочей температуры и механической прочности колбы. При заданном сроке службы определяется $t_{1\,max}$ с учетом скорости кристаллизации кварца. Затем по $t_{1\,min}$ находится предельное давление паров ртути. Тепловой расчет проводится аналогично приведенному выше, однако при использовании водяного охлаждения он усложняется, так как необходимо дополнительно учитывать толщину стенки колбы, тепловые напряжения в ней, скорость протока хладагента и т. п.

Специфическими среди ламп с принудительным охлаждением являются ртутно-капиллярные лампы. Светящее тело нитевидной формы этих ламп имеет яркость, достигающую $(250 - 400) \cdot 10^6$ Мкд/м². Лампа представляет собой разрядную трубку в виде толстостенного кварцевого капилляра, помещенного в трубку с водяным охлаждением (рис. 18.5). Давление паров ртути в капилляре может достигать 10 МПа и более. Для охлаждения ламп может использоваться водопроводная вода, однако при этом образуется осадок на колбе лампы, поэтому в некоторых случаях применяются специальные аппараты с замкнутой циркуляцией дистиллированной воды.

Особое место занимают ртутные шаровые лампы с короткой дугой (ДРШ). Благодаря высоким яркостям, малым размерам светящего тела, они нашли широкое применение в проекционной технике. Конструктивно эти лампы представляют собой колбу шаровой или эллипсоидной формы с двумя электродами, расположенными на небольшом расстоянии (рис. 18.5). У некоторых типов ламп имеется третий электрод, используемый для зажигания разряда. Лампы наполняются дозированным количеством ртути (рабочее давление 20—50 МПа) и инертным газом (давление 4—1 кПа). Из-за малого расстояния между электродами они работают при напряжении сети 220 и 127 В (в некоторых случаях питающее напряжение приходится уменьшать до 36 и даже 24 В).

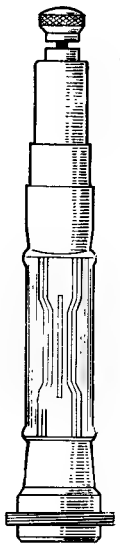


Рис. 18.4. Общий вид и устройство ртутно-кварцевых капиллярных ламп с водяным охлаждением

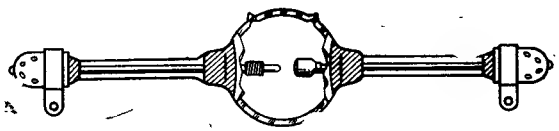


Рис. 18.5. Общий вид ртутно-кварцевой лампы сверхвысокого давления мощностью 10 кВт с короткой дугой

Ртутные лампы высокого и сверхвысокого давления можно подразделять на пять основных типов, отличающихся по своим основным физическим и конструктивным признакам; их параметры приведены в табл. 18.1.

18.2. РТУТНЫЕ ЛАМПЫ С ИСПРАВЛЕННОЙ ЦВЕТНОСТЬЮ

Использование кварцевого стекла, пропускающего ультрафиолетовое излучение и спектр ртутного разряда, позволяет преобразовывать за счет люминофоров ульт-

Таблица 18.1

Тип лампы	Мощность, Вт	Рабочее давление, МПа	Градиент потенциала, В/см	Яркость, 10^6 кд/м²	Световая отдача, лм/Вт	Диаметр трубки или шара, мм	Расстояние между электродами, см
Трубчатые лампы высокого давления из тугоплавкого стекла	150—5000	0,2—2	7—30	1—3	30—50	20—45	4—120
Кварцевые трубчатые лампы высокого давления от 0,02 до 0,2 МПа	100—5000	0,02—0,2	7—30	1—3	30—50	5—40	5—100
Кварцевые трубчатые лампы высокого давления от 0,2 до 2,0 МПа	75—20 000	0,2—2,0	20—200	3—12	35—75	5—40	5—150
Кварцевые трубчатые лампы сверхвысокого давления с водяным охлаждением	50—5000	5,0—10,0	200—500	200—800	60—70	1—1	0,8—5
Кварцевые шаровые лампы сверхвысокого давления с короткой дугой*	50—10 000	1,0—7,0	100—300	50—600	50—60	10—100	0,2—1

* Лампы с очень малым расстоянием между электродами (0,3—0,6 мм) имеют световую отдачу 10—20 лм/Вт, но яркости до (1500—2500)× $\times 10^6$ кд/м².

Таблица 18.2

Параметр	ДРЛ80	ДРЛ125	ДРЛ250	ДРЛ400	ДРЛ700	ДРЛ1000
Номинальная мощность лампы, Вт	80	125	250	400	700	1000
Напряжение на лампе, В	115	125	135	135	135	135
Ток, А	0,85	1,2	2,2	3,2	5,6	8,2
Световой поток (после 100 ч), лм	3100	5000	11 500	21 000	37 000	52 000
Красное отношение, %	7—8	7—8	7—8	7—8	7—8	7—8
Световая отдача, лм/Вт	39	40	46	52,5	53	52
Диаметр горелки, мм	14	14	19	21	25	27
Расстояние между электродами, мм	20	30	50	70	100	120
Диаметр лампы, мм	75	75	90	120	150	165
Полная длина лампы, мм	160	180	230	290	350	360
Срок службы, тыс. ч	9—12	9—12	9—12	9—12	8—9	8—9

рафиолетовое излучение в видимое, значительно увеличивая световую отдачу ламп. Источники света, использующие этот принцип, — так называемые дуговые ртутные лампы с люминофором (ДРЛ) получили широкое распространение. Лампа этого типа имеет ртутно-кварцевую горелку трубчатой формы, размещенную внутри стеклянной колбы, покрытой изнутри тонким слоем люминофора. Последний, поглощая ультрафиолетовое излучение ртутного разряда, превращает его в видимое излучение. Для видимого излучения ртутного разряда люминофор достаточно прозрачен. Конструкция лампы ДРЛ приведена на рис. 18.6.

Оценка возможности преобразования ультрафиолетового излучения в видимое показывает, что при квантовом выходе, равном единице, и оптимальной толщине люминофорного слоя дополнительный световой поток в пересчете на длину волны 555 нм может составить 110—115% светового потока ртутных линий.

Однако реально из-за потерь различного рода значение светового потока, получаемого за счет применения люминофора, значительно ниже. Потери в люминофорах зависят от толщины слоя, гранулометрического состава, технологии приготовления и нанесения, вакуумной обработки.

Применительно к лампам ДРЛ люминофоры должны удовлетворять ряду основных требований: 1) преобразовывать в видимое излучение с высоким квантовым выходом все ультрафиолетовое излучение ртутного разряда (особенно линии с длинами волн 313 и 365 нм); 2) преобразованное видимое излучение в сочетании с видимым излучением ртутного разряда должно обеспечивать белый свет и достаточно правильную цветопередачу; 3) иметь достаточную температурную стойкость, позволяющую использовать его при рабочих температурах свыше 200 °С.

К люминофорам, удовлетворяющим этим требованиям и нашедшим применение в производстве ламп ДРЛ, относятся следующие:

1. Фторогерманат магния, активированный четырехвалентным марганцем. Квантовый выход при 40 °С равен 0,9 для $\lambda=254$ нм и около 0,4 для $\lambda=365$ нм. Этот люминофор имеет высокую фотохимическую и термическую стабильность при работе в среде инертного газа. Для видимого излучения поглощение мало. При нагреве от 40 до 300 °С яркость свечения возрастает почти в 2 раза, затем резко падает. Недостаток — высокая стоимость исходного сырья. Фторогерманат магния выпускается с добавкой примеси — двуокиси кремния, разделяющей частицы люминофора. За счет прозрачности примеси ультрафиолетовое излучение проникает в глубь люминофорного слоя и возбуждает его частицы по всей поверхности, при этом доля «красной» составляющей излучения возрастает до 7—9%.

2. Фосфатные люминофоры, активированные оловом, при возбуждении ртутным спектром дают небольшое синее излучение и более интенсивное оранжево-красное. При температуре 160 °С максимум излучения находится в районе $\lambda=600$ нм. Они устойчиво работают в инертной среде. Яркость достигает максимального значения при температуре около 200 °С, далее падает. К их недостаткам относится малая чувствительность к линии: $\lambda=365$ нм.

3. Арсенат магния и лития, активированный четырехвалентным марганцем. Максимальный выход люминесценции при температуре около 220—250 °С. Под действием ультрафиолетового излучения происходит переход четырехвалентного марганца в двухвалентный, что приводит к прекращению свечения. Для поддержания марганца в четырехвалентном состоянии приходится использовать наполнение углекислым газом, что приводит к уменьшению срока службы горелки из-за окисления фольговых вводов и токоподводов.

4. Тройной силикат бария, стронция и лития, активированный церием и двухвалентным марганцем, благодаря особенностям спектральной характеристики люминесценции обеспечивает более высокую световую отдачу. Недостатком люминофора является низкий температурный диапазон работы (до 100 °С), что не позволяет использовать его в мощных лампах.

5. Ортсиликат кальция и ортосиликат кальция и стронция, активированный свинцом и марганцем, обладает высокой температурной стабильностью (до 600 °С), что позволяет сокращать размеры внешней колбы.

Спектры излучения и поглощения некоторых люминофоров приведены на рис. 18.7.

Важной проблемой, определяющей значение светового потока лампы и его спектральный состав, является обеспечение оптимальной толщины наносимого люминофорного слоя. Известно, что с ростом толщины слоя поток люминесценции возрастает, достигает максимума и медленно падает, при этом видимое излучение ртутного разряда монотонно убывает. Так как излучение люмине-

сценции сосредоточено в основном в оранжево-красной части спектра, в связи с чем суммарное излучение несколько изменяет спектр по сравнению с только ртутным разрядом, принято оценивать результирующий спектр по так называемому «красному отношению». «Красное отношение» выражается следующим образом:

$$r_{кр} = \frac{\int_{610}^{700} \varphi(\lambda) K(\lambda)\, d\lambda}{\int_{380}^{700} \varphi(\lambda) K(\lambda)\, d\lambda} \cdot 100\%. \qquad (18.9)$$

Лампы с бо́льшим «красным отношением» имеют лучшее качество цветопередачи. Оптимальное значение толщины слоя люминофора из фторогерманата и арсената магния достигается при удельной массе покрытия приблизительно 2 мг/см², «красное отношение» при этом равно 8%, а световой поток лампы составляет около 87% светового потока лампы без люминофора. Для ортофосфата цинка и стронция световой поток имеет максимальное значение при нанесении около 4 мг/см² люминофора. При этом световой поток составляет около 115% потока лампы без люминофора, а $r_{кр} = 4 \div 5\%$. Аналогично изменяются зависимости светового потока и «красного отношения» лампы ДРЛ от толщины слоя и для других люминофоров.

При конструировании ламп ДРЛ расчету подлежат собственно горелка с парами ртути при давлении в рабочем режиме 0,5—0,8 МПа, что обеспечивает оптимальное соотношение ультрафиолетового и видимого излучений разряда, и наружная колба с нанесенным на ее внутреннюю поверхность слоем люминофора. Расчет горелки выполняется по описанной ранее методике (§ 18.1). Расположение горелки в наружной колбе, размеры и форма колбы должны создавать оптимальную температуру для слоя люминофора по всей поверхности и обеспечивать поглощение всего ультрафиолетового потока горелки. Следовательно, форма колбы должна по возможности обеспечивать изотермичность ее поверхности. Нагрев внешней колбы происходит за счет теплопередачи через наполняющий ее газ (поглощение части излучения разряда, нагретой кварцевой горелки и электродов). Охлаждение определяется теплопередачей в окружающую среду и излучением нагретого стекла. Для получения поверхности с одинаковой температурой необходимо, чтобы колба имела

примерно одинаковую тепловую нагрузку. При некоторых допущениях для этого достаточно, чтобы выполнялось требование равной облученности колбы. Расчеты, как правило, приводят к эллипсоидной форме колбы (по крайней мере для ее центральной части). Расчет размеров

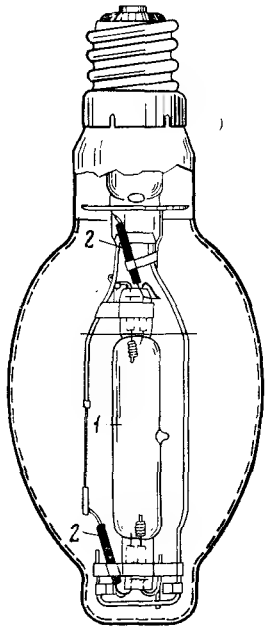


Рис. 18.6. Общий вид лампы ДРЛ400:
1 — ртутно-кварцевая горелка; 2 — резистор

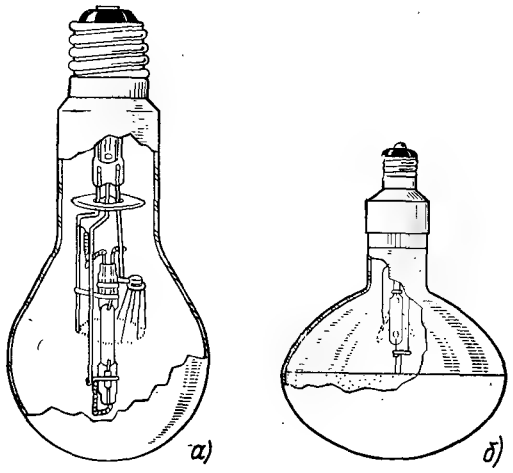


Рис. 18.8. Общий вид ртутно-накальных ламп;
а — в колбе из обычного стекла; б — в колбе-рефлекторе из увиолевого стекла

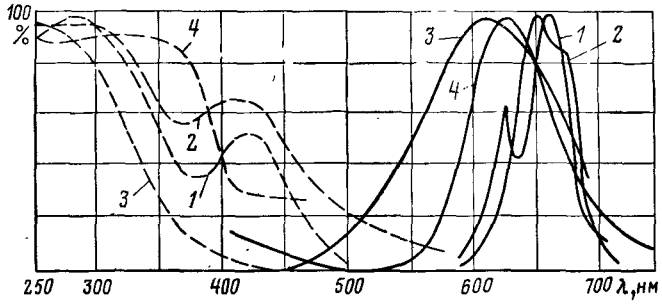


Рис. 18.7. Спектры излучения (сплошные линии) и спектры поглощения (пунктирные) люминофоров:
1 — фторогерманат магния; 2 — арсенат магния; 3 — ортофосфат цинка и стронция; 4 — тройной силикат бария, стронция и лития

колбы производится по общим формулам (см. § 17.2), при этом чем выше оптимальная температура люминофора, тем меньшими размерами должна обладать колба. На практике теплоотвод от колбы зависит от положения горения лампы (горизонтального или вертикального) и от наличия светотехнической арматуры, поэтому форму колбы делают несколько уширенной к цоколю, чтобы использовать лампу в вертикальном положении цоколем вверх.

Промышленностью освоена широкая номенклатура ламп ДРЛ мощностью от 80 до 2000 Вт для работы в сетях переменного тока напряжением 220 В (для больших мощностей 380 В). Для облегчения зажигания горелки ламп делаются с одним (трехэлектродные лампы) или двумя (четырехэлектродные) зажигающими электродами, соединенными через резисторы с сетевыми проводами. По конструкции колбы лампы бывают двух типов: полностью покрытые люминофором и в виде рефлектора, имеющего отражающее покрытие на части колбы.

Ртутно-накальные лампы в отличие от ламп ДРЛ для улучшения цветности имеют в качестве дополнительного источника излучения вольфрамовую спираль, включенную последовательно с лампой в сеть. Эта спираль играет роль балластного сопротивления, благодаря чему отпадает необходимость в дросселе. Ртутная горелка и вольфрамовая спираль монтируются в общей стеклянной колбе и ввиду отсутствия дросселя включаются непосредственно в сеть. Однако из-за низкой световой отдачи вольфрамовой спирали световая отдача ртутно-накальных ламп не превышает 20 лм/Вт. На рис. 18.8 приведен общий вид ртутно-накальных ламп в различных колбах. Для увеличения световой отдачи ртутно-накальных ламп иногда используется люминофор, что позволяет увеличить световой поток приблизительно на 30%.

При конструировании ртутно-накальной лампы (с люминоформ или без него) необходимо решить следующие задачи: обеспечивать зажигание лампы при номинальном напряжении сети, а также необходимое «красное отношение» и достаточно высокие значения срока службы и световой отдачи. Основные светотехнические характеристики ртутно-накальных ламп следующие:

отношение мощности ртутной горелки $P_{рт}$ и вольфрамовой спирали $P_н$

$$\frac{P_{рт}}{P_н} = \frac{\Phi_{рт+л}}{\Phi_н} \cdot \frac{\eta_н}{\eta_{рт+л}}; \qquad (18.10)$$

полная световая отдача источника

$$\eta_V = \frac{\Phi_{рт+л} + \Phi_н}{P_{рт} + P_н} = \eta_н \frac{\left(\frac{\Phi_{рт+л}}{\Phi_н} + 1\right)}{\left(\frac{\Phi_{рт+л}}{\Phi_н} \frac{\eta_н}{\eta_{рт+л}} + 1\right)}, \qquad (18.11)$$

где Ф — световые потоки; P — мощности; η — световые отдачи (индексы рт+л относятся к ртутной лампе с люминофором; н — к вольфрамовой спирали; рт — к ртутной горелке).

Для «красного отношения» лампы, в которой все ультрафиолетовое излучение ртутного разряда преобразуется в красное излучение, можно записать:

$$r_{общ} = \frac{\Phi_{рт+л} r_{рт+л} + \Phi_н r_н}{\Phi_{рт+л} + \Phi_н} = \frac{(\Phi_{рт+л} r_{рт+л}/\Phi_н + r_н)}{(\Phi_{рт+л}/\Phi_н + 1)}. \qquad (18.12)$$

При расчете параметров ртутно-накальной лампы необходимо учитывать также ряд особенностей, связанных с устойчивостью горения разряда (при работе с активным сопротивлением в качестве балласта ухудшается повторное зажигание разряда), сроком службы вольфрамовой спирали (из-за тяжелого режима работы во время разгорания лампы) и т. д. Для увеличения общей световой отдачи необходимо увеличивать $\Phi_{рт+л}/\Phi_н$, т. е. повышать мощность ртутной лампы. Однако из-за возможности погасания разряда нельзя превышать определенный предел $U_{рт}/U_с$. Для активного балласта условие стабильной работы лампы выполняется при $U_{рт}/U_с \leqslant 0{,}65 \div 0{,}7$. С учетом колебаний напряжения сети $U_{рт} \leqslant 130$ В и соотношения $P_{рт}/P_н \leqslant U_{рт}/U_н \leqslant 130/90 = 1{,}45$ из (18.10) получим:

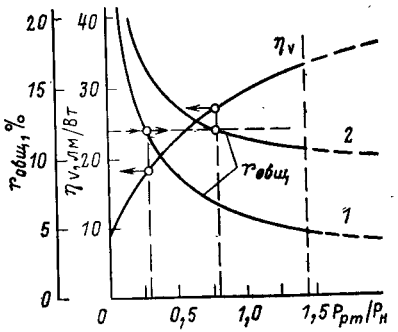


Рис. 18.9. Общая световая отдача η_V и «красное отношение» в зависимости от $P_{рт}/P_н$ ($\eta_{рт}$ = 50 лм/Вт; $\eta_н$ = 8 лм/Вт; $r_н$ = 30%; 1 — $r_{рт+л}$ = 1,5% 2 — $r_{рт+л}$ = 8%)

$$\eta_н \frac{\Phi_{рт+л}}{\Phi_н} = \eta_{рт+л} \frac{P_{рт}}{P_н} \leqslant 1{,}4\, \eta_{рт+л}, \qquad (18.13)$$

т. е. чем выше $\Phi_{рт+л}/\Phi_н$, тем ниже может быть световая отдача вольфрамовой спирали. При включении ртутно-

накальной лампы практически все напряжение оказывается приложенным к вольфрамовой спирали, что вызывает превышение температуры. Старение спирали при каждом включении происходит намного быстрее, чем в установившемся режиме: «цена включения» достигает значения около 40 ч.

Фактический срок службы $\tau_ф$ при этом будет равен:

$$\tau_ф = \frac{\tau_0 \tau_1}{\tau_1 + \Delta\tau}, \qquad (18.14)$$

где τ_0 — срок службы, на который рассчитывается спираль; $\Delta\tau$ — «цена включения»; τ_1 — время между включениями.

При этом световая отдача спирали, соответствующая τ_0, должна быть:

$$\tau_ф/\tau_0 = (\eta_н/\eta_0)^{-7}. \qquad (18.15)$$

На рис. 18.9 приведены результаты расчета значений η_V и $r_{общ}$ [(18.11) и (18.12)] для ртутно-накальной лампы при различных $P_{рт}/P_н$.

Поскольку световая отдача ртутно-накальных ламп даже с люминофором не превышает 30 лм/Вт, их применение оправдано только тогда, когда нежелательно использование балласта.

18.3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ РТУТНЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Помимо описанных источников света для различных целей выпускаются специальные, нашедшие применение во многих отраслях народного хозяйства. Так, в сельском хозяйстве все более широко используются ртутные лампы, компенсирующие недостаток солнечного света в парниковых хозяйствах и позволяющие круглогодично выращивать семенной фонд новых культур в вегетационных шкафах и камерах. Подобные лампы используются для ликвидации ультрафиолетовой недостаточности и обеззараживания среды на животноводческих фермах. Для выращивания растений применяются специальные лампы с люминофором, приближающим спектр излучения источника к кривой фотосинтеза зеленого листа, и др.

Значительное количество специальных ламп выпускается для технологических целей. Это, например лампы для репрографии (светокопировальные аппараты, микрофильмирование, фотоэкспонирование печатных плат и т. п.), представляющие собой, как правило, трубчатый ртутный источник света с давлением ртути 0,2—0,4 МПа.

Длина лампы определяется шириной рабочей зоны множительного аппарата и колеблется от нескольких сантиметров до 150 см. Для промышленного производства ряда веществ, особенно фотохимическим способом, применяются специальные ртутные трубчатые лампы (погружного типа) мощностью от сотен ватт до 20 кВт. С их применением связано освоение производства лекарственных препаратов (например, витамина D_2), освоение непрерывного процесса фотополимеризации лаковых покрытий в мебельной промышленности, получение синтетических веществ (полимеров типа капрон и т. п.).

Особенность ртутного разряда — способность обеспечивать достаточно стабильное по интенсивности излучение линий, перекрывающих широкий диапазон длин волн,— позволила создать на базе этих ламп так называемую ультрафиолетовую нормаль. Этот источник представляет собой специально сконструированную ртутно-кварцевую лампу мощностью 250 Вт с рабочим давлением паров ртути 0,15 МПа. Для уменьшения влияния на поток излучения почернения колбы вблизи электродов у такой лампы оставляется открытой только центральная часть колбы. Лампа работает на постоянном токе с активным регулируемым балластом. Рабочее положение — вертикальное, анодом вверх. Распределение энергии в спектре излучения ультрафиолетовой нормали является эталонным и используется при градуировке чувствительности спектральных приборов.

Глава девятнадцатая

ГАЗОВЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В большинстве газовых ламп высокой интенсивности используется излучение разрядов в инертных газах — аргоне, криптоне и ксеноне. Наиболее широко применяются ксеноновые лампы, работающие при больших плотностях тока и давлении от сотен паскалей до мегапаскалей. Для разряда в инертных газах характерна возрастающая вольт-амперная характеристика (см. гл. 17), что позволяет обеспечить его стабилизацию при небольших балластных сопротивлениях. В отличие от ламп с парами металлов плотность газа в колбе ксеноновой лампы практически не изменяется при изменении теплового режима, и поэтому период разгорания лампы составляет промежуток времени менее секунды.

Недостатками газовых ламп высокой интенсивности являются значительно меньший градиент положительного столба, из-за чего при

той же мощности источника сильно возрастают рабочие токи, и высокое начальное давление наполнения, требующее специальных высоковольтных устройств для зажигания.

19.1. ТРУБЧАТЫЕ КСЕНОНОВЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Наибольший интерес у ксеноновых ламп высокого давления представляет непрерывность спектра их излучения, обеспечивающая качественную цветопередачу освещаемых объектов. Лишь в инфракрасной области спектра имеется несколько интенсивных, как правило, самообращенных линий. На рис. 19.1 представлен спектр разряда в ксеноне. Из-за незначительного изменения спектра при изменении плотности тока

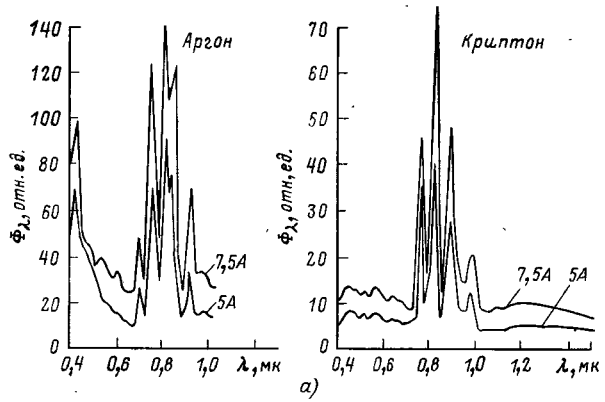
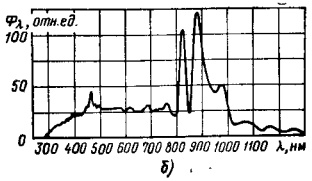


Рис. 19.1. Распределение энергии в спектре излучения ламп высокой интенсивности:

а — короткая дуга сверхвысокого давления, P=40 МПа, аргон и криптон, два режима; *б* — ксеноновая лампа высокого давления трубчатой формы мощностью 6 кВт с водяным охлаждением



и давления ксенона цветовая температура и координаты цветности лампы весьма стабильны ($T_{цв}$=6050÷6300 К). Так как в видимой части спектр излучения ксенонового разряда близок к солнечному, ксеноновые лампы нашли широкое применение в киноопроекции и в установках, имитирующих солнечное излучение.

При конструировании ксеноновых трубчатых ламп с естественным и принудительным охлаждением, в отличие от ртутных ламп, особое внимание уделяется обеспечению устойчивости горения дуги из-за значительно больших конвективных потоков. Экспериментально установлено, что при диаметрах разрядной трубки 2—4 см конвективная нестабильность наступает при начальных давлениях свыше 150 кПа.

При расчете электрических параметров определяют [28] сопротивление лампы:

$$R_л = \rho l/\pi r_1^2\theta^2, \tag{19.1}$$

где ρ — эффективное удельное сопротивление плазмы разряда; l — расстояние между электродами; r_1 — внутренний радиус трубки; θ — коэффициент, связанный с эффективным радиусом разрядного канала.

Теоретически определить отношение ρ/θ^2 трудно, поэтому на практике используют зависимости, полученные на основании эксперимента. В частности, обработка многочисленных результатов дала зависимость

$$\rho/\theta^2 \approx 4{,}5\cdot 10^{-3}\cdot p^{1/2}_{хол} r_1^{-1/2} E^{-3/2}, \tag{19.2}$$

где ρ/θ^2 — Ом·см; $p_{хол}$ — Па; r_1 — см и E — В/см.

Определение геометрических размеров ламп, исходя из заданных значений мощности $P_л$ и напряжения $U_л$, производится аналогично расчету тела накала при заданной температуре. На основании уравнения баланса энергии

$$P_л = U_л^2/R_л = \pi d_1 l w_1(t), \tag{19.3}$$

где $w_1(t)$ — удельная нагрузка на единицу поверхности, Вт/см², изменяющаяся для различных допустимых температур, и (19.1) получим для лампы длиной l и диаметром d_1:

$$l = 0{,}43\,\frac{U_л^{2/3} P_л^{1/3}}{w_1^{2/3}\,(\rho/\theta^2)^{1/3}}; \tag{19.4}$$

$$d_1 = 0{,}74\,\frac{P_л^{2/3}\,(\rho/\theta^2)^{1/3}}{w_1^{1/3} U_л^{2/3}}. \tag{19.5}$$

Подставляя зависимость для ρ/θ^2 из (19.2) в (19.4) я (19.5), получаем:

$$l = 1{,}4 P_л^{0,3} U_л^{0,7}/w_1^{0,5} p_{хол}^{0,1}; \tag{19.6}$$

$$d = 0{,}24 P_л^{0,7} p_{хол}^{0,1}/w_1^{0,5} U_л^{0,7}, \tag{19.7}$$

где $P_л$ — мощность лампы, Вт; $U_л$ — напряжение на лампе, В; w_1 — удельная нагрузка, Вт/см²; $p_{хол}$ — холодное давление наполняющего газа, Па.

Исходя из требований обеспечения повторного зажигания необходимо иметь $d \geqslant 1{,}8$ см. Давление $p_{хол}$ обычно выбирают в пределах

от 6,50 до 20,0 кПа. Из эксперимента определена зависимость температуры t_2 от удельной нагрузки w_1 для $p_{хол}$ от 8,0 до 15,0 кПа и при d_1 от 2,1 до 2,5 см в условиях естественного охлаждения:

w_1 (t), Вт/см²	10	15	20	25	30
t_2, °С	670	800	860	900	940

Для случая принудительного охлаждения значения w_1 и t_2 определяются по ранее приведенным данным (см. гл. 17).

Удельная сила света трубчатых ламп I/l с естественным и принудительным охлаждением в направлении, перпендикулярном оси лампы, зависит от удельной мощности лампы $P_л/l$ следующим образом:

$$I/l = c[(P_л/l) - b], \qquad (19.8)$$

где c и b — коэффициенты, имеющие значения:
c=3,3 кд/Вт, b=30 Вт/см при $50 \leqslant P_л/l \leqslant 200$ Вт/см; c=4,5 кд/Вт, b=60 Вт/см при $200 \leqslant P_л/l \leqslant 1200$ Вт/см.

При одинаковой удельной мощности P_1 удельная сила света слабо зависит от давления, диаметра трубки и градиента потенциала. Зависимость (19.8) получена для $p_{хол}$ от 2,0 до 20,0 кПа и d_1 от 1,9 до 3,9 см.

Для светового потока и световой отдачи в зависимости от удельной мощности, вводя отношение $\gamma = \Phi_1/I$, получим из (19.8):

$$\Phi_1 = \gamma c(P_1 - b); \qquad (19.9)$$

$$\eta_{ст} = \Phi_1/P_1 = \gamma c(1 - b/P_1). \qquad (19.10)$$

Таблица 19.1

Параметр	Тип лампы				
	ДКсТ2000	ДКсТВ6000	ДКсТ10 000	ДКсТВ25 000	ДКсТ100 000
Мощность, кВт	2	6	10	25	100
Напряжение питания, В	40	220	220	220	380
Напряжение на лампе, В	40	200	200	200	370
Световая отдача, лм/Вт	17	20	22	36	35
Длина светящей части, мм	140	450	950	200	2500
Диаметр трубки, мм	28	27	35	36	75
Охлаждение	Естественное	Водяное	Естественное	Водяное	Естественное

Значение γ для ламп с естественным и водяным охлаждением составляет приблизительно (11,25±0,25) лм/Вт. Как следует из (19.10), световая отдача ксеноновых ламп, стремясь к предельному значению с ростом удельной мощности, достигает 43—50 лм/Вт.

Параметры некоторых типов трубчатых ксеноновых ламп приведены в табл. 19.1.

Особенность ксеноновых ламп — возрастающая вольт-амперная характеристика — позволяет, в принципе, включать их непосредственно в сеть без балластного сопротивления. Однако, учитывая, что для трубчатых ламп [5] $P_л$ пропорционально $U_л^{7/2}$, получаем при колебаниях напряжения сети:

$$\Delta P_л/P_л \approx (^7/_2)\Delta U_с/U_с, \qquad (19.11)$$

поэтому предпочтительнее обеспечивать стабильный режим работы лампы с помощью балласта.

19.2. КСЕНОНОВЫЕ ЛАМПЫ С КОРОТКОЙ ДУГОЙ

Основными особенностями ксеноновых ламп в колбах шаровой формы являются высокая яркость и малые размеры светящего тела. Так как по конструкции эти лампы подобны ртутным лампам высокого давления с короткой дугой, расчет их параметров осуществляется аналогично приведенному в § 18.1. Расстояние между электродами у наиболее распространенных типов ламп составляет от 3 до 6 мм У ламп специальных типов это значение достигает 0,3—2,5 мм. Давление наполнения ксеноном колеблется от 0,1 до 1,5 МПа. Лампы, работающие на постоянном токе, в связи со значительно большей мощностью, выделяющейся на аноде по сравнению с катодом, имеют более массивные аноды.

Так как в шаровых ксеноновых лампах большое значение имеют конвективные потоки, то лампы эксплуатируются только в вертикальном положении — анодом вверх. Вследствие значительно меньшего градиента потенциала в ксеноне и малого расстояния между электродами при той же мощности, что у ртутных ламп, значения тока ксеноновых ламп в 4—5 раз больше. Из-за этого в лампах применяются более массивные электроды и в основном цилиндрические вводы.

Для расчета значение анодно-катодного падения потенциала принимается равным приблизительно 7 В, при этом на катодное падение приходится примерно 5 В. Вольт-амперные характеристики имеют линейно-возрастающий характер. Из экспериментальных значений, а так-

Таблица 19.2

p, МПа	A	k	n
0,5	0,233	0,53	0,235
1,0	0,215	0,58	0,213
2,0	0,180	0,61	0,198
4,0	0,110	0,63	0,185

Таблица 19.3

p, МПа	c	E_0	M
0,5	0,783	70,6	0,95
1,0	0,797	73,4	0,75
2,0	0,811	83,3	0,58
4,0	0,826	97,1	0,45

же расчетов, базирующихся на модельных представлениях дуги, получена следующая формула для напряжения столба дуги:

$$U_{ст} = 9{,}4\sqrt{p}Al^kI^n, \qquad (19.12)$$

где p — давление, МПа; l — длина дуги, см; I — ток, А; A, k, n — параметры, зависящие от давления (табл. 19.2).

Для удельного излучения потока Φ_1 и яркости столба дуги на оси L_e получены следующие зависимости:

$$\Phi_1 = \frac{cIE_0}{1 + Mx}; \qquad (19.13)$$

$$L_e = \frac{6{,}66E_0\sqrt{I}}{(1 + Mx)(1 + 1{,}66x)^{0{,}74}}, \qquad (19.14)$$

где $x = 61{,}5zI^{-0{,}5}$ (z — расстояние от катода, см); c, E_0 и M — параметры, значения которых приведены в табл. 19.3.

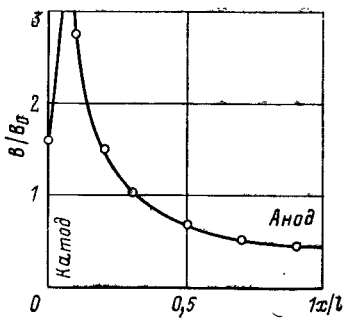


Рис. 19.2. Относительное распределение яркости по оси разряда для ксеноновых ламп сверхвысокого давления с короткой дугой на постоянном токе

Для перевода значений яркости столба в кд/м² необходимо умножить значения, полученные по (19.14), на коэффициент, равный 80.

Относительное распределение яркости вдоль оси разряда для ксеноновых ламп сверхвысокого давления с короткой дугой, работающих на постоянном токе, приведено на рис. 19.2. Гиперболический спад яркости от катода к аноду связан с расширением канала разряда от катодного пятна, имеющего максимальную яркость B_0, по направлению к аноду.

Эмпирическое выражение для относительной яркости:

$$L/L_0 = 0{,}38(x/l)^{-0{,}8}, \qquad (19.15)$$

где L — значение яркости для координаты x.

Распределение яркости поперек канала разряда в любом его сечении описывается параболической функцией

$$L/L_0 = 1 - 0{,}5(2a/b_0)^2, \qquad (19.16)$$

где a — расстояние от оси разряда в поперечной плоскости; b_0 — полуширина разряда.

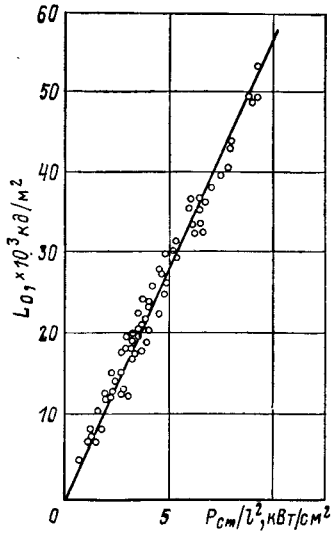
На рис. 19.3 и 19.4 приведены в зависимости от мощности, яркости в геометрическом центре разряда и удельные силы света. Параметры некоторых типов ксеноновых ламп даны в табл. 19.4.

Развитие исследований космического пространства, разработка новой кинопроекционной техники, создание имитаторов солнечного излу-

Таблица 19.4

Тип лампы	Мощность, Вт	Ток, А	Напряжение на лампе, В	Яркость, 10^6 кд/м²	Диаметр колбы, мм	Расстояние между электродами, мм
ДКсТ-200	200	9	22	90	27	2—2,5
ДКсТ-1000А	1000	57	20	450	44	2,6—3,3
ДКсТ-1000-1	1000	55	25	200	44	3,7—4,9
ДКсР-3000	3000	120	25	1000	50	3,5
ДКсР-5000А	5000	160	31	2000	50	3,5

чения потребовали наличия ламп мощностью 15 кВт и более. В связи с этим были изготовлены специальные типы ламп с водяным охлаждением электродов, что позволило повысить мощность источников до 30 кВт. Яркость подобных ламп достигает 10^{10} кд/м². Реальные воз-



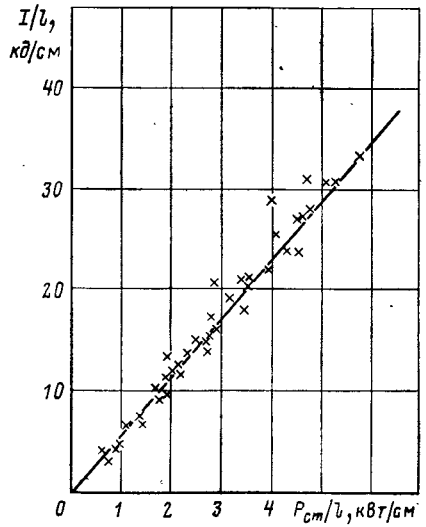


Рис. 19.3. Зависимость яркости в геометрическом центре разряда от отношения $P_{ст}/l^2$ для ксеноновых ламп сверхвысокого давления с короткой дугой постоянного тока

Рис. 19.4. Зависимость удельной силы света I/l от удельной мощности для ксеноновых дуг сверхвысокого давления с короткой дугой постоянного тока

можности создания мощных ламп появились также после внедрения разборных вакуумно-плотных вводов с водяным охлаждением, позволяющих пропускать практически любые токи, уменьшить не только размеры электродов, но и колбы ламп. Дальнейшее развитие специальных ксеноновых ламп обязано появлению разборной металлической

ксеноновой лампы с оптическими элементами. Лампа представляет собой толстостенный металлический водоохлаждаемый сосуд с внутренней зеркально отражающей поверхностью. Кварцевое окно, обращенное выпуклостью внутрь (из-за чего оно выдерживает значительные усилия), а также водяное охлаждение позволяют выводить значительный поток излучения разряда. Лампы такого типа имеют мощности от 40 до 150 кВт. Разборная конструкция позволяет заменять вышедшие из строя элементы лампы.

Глава двадцатая

ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

20.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Для решения ряда научно-технических задач требуется получать высокие значения мгновенной интенсивности излучения. И именно с помощью высокоинтенсивного излучения импульсных ламп удалось создать мощные оптические квантовые генераторы когерентного излучения.

Импульсной лампой называется газоразрядный прибор, обеспечивающий возникновение в газовом промежутке в определенные по длительности моменты времени мощных импульсных (искровых) электрических разрядов, сопровождающихся интенсивным световым излучением. Импульсные лампы, в отличие от открытых воздушных искровых промежутков, дающих нестабильное от импульса к импульсу излучение, имеют герметично запаянный внешний баллон из стекла или кварца, наполненный химически неактивным (чаще всего инертным) газом. Управление моментом пробоя осуществляется или одним дополнительным, или несколькими управляющими электродами, на которые подается высоковольтный импульс, или кратковременным увеличением разности потенциалов между рабочими электродами. Особенность питания импульсных ламп заключается в том, что источник электрической энергии при малой средней мощности должен обеспечивать большую силу тока в течение короткого времени. В подавляющем большинстве случаев в качестве такого источника используется накопительный конденсатор, заряжаемый от источника постоянного тока.

Кроме параметров, свойственных источникам света непрерывного действия (форма и размеры светящего объема, световые или энергетические параметры, спектральный состав излучения), для импульсных ламп задаются два дополнительных требования — длительность импульса и частота его повторения. При этом специфической особенностью импульсных ламп является то, что путем изменения схемы и режима питания лампы можно в значительных пределах варьировать

силу излучения, длительность импульсов (вспышек) и частоту повторения.

Исходя из особенностей применения, импульсные лампы можно подразделять на два класса. К первому относятся лампы с малым светящим объемом и максимальной яркостью, ко второму — с максимальной энергией вспышки (при этом иногда дополнительным требованием является специальная форма светящего тела).

Импульсные источники света кроме общепринятых световых и энергетических фотометрических величин (ГОСТ 7601-78) характеризуются также рядом специфических, интегральных по времени фотометрических величин (ГОСТ 16803-78). В большинстве практических случаев для импульсной лампы указываются только длительность импульса излучения, значения пиковых и интегральных световых и энергетических фотометрических величин. Под длительностью импульса обычно подразумевается время, а течение которого сила света лампы превышает 35% пикового значения. Для сравнения импульсных ламп иногда используют такие параметры, как световая отдача, спектральный КПД, и ряд других.

20.2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

Во время своего существования импульсный разряд проходит несколько стадий — от момента подачи зажигающего импульса до разрядки питающего конденсатора. Основные из них следующие: возникновение разряда, связанное с электрическим пробоем газа, первичное нарастание тока до расширения канала, формирование расширяющегося канала разряда с выделением квазистационарной сильноточной стадии, затухание импульсного разряда. Каждая из стадий может иметь свои особенности для различных импульсных ламп. Так, отличают различные формы пробоев, управляемых характерными для каждого вида механизмами; стадия расширяющегося канала имеет отличия для трубчатых ламп и шаровых импульсных ламп со «свободно» расширяющимся разрядом. Наиболее интересной с точки зрения излучательных характеристик является квазистационарная сильноточная стадия импульсного разряда.

Основные электрические и временные характеристики сильноточной стадии разряда могут быть получены путем решения уравнения разряда конденсатора через электрическую цепь, включающую в себя импульсную лампу:

$$I(r_к + r_л) + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int I\,dt = U_c, \qquad (20.1)$$

где C — емкость конденсатора; $r_к$ — эквивалентное сопротивление проводников контура и конденсатора; $r_л$ — сопротивление лампы; L — индуктивность контура.

При квазистационарном характере разряда, исходя из уравнений термической теории, минимальное удельное сопротивление плазмы при

рассеянии электронов на положительных ионах равно:

$$\rho_{min} \approx 1{,}3 \cdot 10^4 \gamma / T^{3/2}, \qquad (20.2)$$

где

$$\gamma = \ln \frac{3kT}{2e^2 n_i^{1/3}};$$

здесь k — постоянная Больцмана; T — температура плазмы; n_i — концентрация ионизованных частиц; e — заряд электрона.

Соотношение (20.2) для импульсных разрядов в тяжелых инертных газах при температурах 7500—9000 К выполняется достаточно хорошо. При этом экспериментальные значения составляют $\rho_{min} = (1 \div 4) \cdot 10^{-2}$ Ом·см. Для определения мгновенного значения $\rho(t)$ применима формула

$$\rho(t) \approx 0{,}1 / \sqrt{E(t)}. \qquad (20.3)$$

При расчете характеристик импульсного разряда разделяют два случая — трубчатой и шаровой лампы. Для трубчатого импульсного источника, учитывая, что в большинстве случаев в стадии сильноточного разряда канал занимает практически все сечение трубки, получаем:

$$r_л \approx \rho 4l / \pi d_1^2, \qquad (20.4)$$

где ρ — удельное сопротивление разряда, Ом·см; l — длина разрядной трубки, см; d_1 — внутренний диаметр разрядной трубки, см.

Уравнение (20.1), если пренебречь значениями L и $\frac{1}{C}\int I\,dt$, имеет следующий вид:

$$U_C(t) = U_C(0)\, e^{-t/rC}, \qquad (20.5)$$

причем

$$I(t) = \frac{U_C(0)}{r} e^{-t/rC},$$

где $r = r_к + r_л$.

Полная энергия, выделяемая в лампе за время одной вспышки,

$$W_1 = \int_0^\infty I^2 r_л dt \approx \frac{CU^2_C(0)}{2}\left(\frac{\bar{r}_л}{\bar{r}}\right), \qquad (20.6)$$

где $\bar{r}_л$ и $\bar{r}$ — соответственно эффективные значения сопротивления лампы и контура.

Длительность вспышки τ определяется подстановкой (20.4) в зависимость

$$\tau \approx \frac{rC}{2} \approx \frac{2\rho l C}{\pi d_1^2}. \qquad (20.7)$$

Удельный поток излучения Φ_1 и удельная мощность потерь на стенках $L_{1ст}$ равны:

$$\left.\begin{aligned} \Phi_1 &= c_1 n^2 x^2 d^2_1 \varkappa E_R, \\ L_{1ст} &= c_2 n x d_1 v_i e U_i, \end{aligned}\right\} \qquad (20.8)$$

где c_1 и c_2 — коэффициенты; E_R — средняя энергия рекомбинации; n — концентрация атомов газа; x — степень ионизации; $\varkappa$ — коэффициент ослабления излучения за счет поглощения; v_i — средняя скорость ухода ионов на стенку; eU_i — энергия ионизации атомов газа.

Для КПД суммарного излучения η имеем:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\text{const} v_i U_i}{p_0 x d_1 \varkappa}}. \qquad (20.9)$$

В случае шаровых импульсных ламп (20.1) с учетом обозначений $\frac{r}{2L} = \delta$ и $\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$ имеет вид:

$$I(t) = \frac{-U_C(0)}{L\sqrt{\delta^2 - \omega^2_0}} e^{-\delta t} \operatorname{sh}\left[\sqrt{\delta^2 - \Phi^2_0} t\right] \quad \text{при } r > 2\sqrt{L/C}; \qquad (20.10)$$

$$I(t) = \frac{-U_C(0)}{L\sqrt{\delta^2 - \omega^2_0}} e^{-\delta t} \sin \omega_C t \quad \text{при } r < 2\sqrt{L/C}, \qquad (20.11)$$

где $\omega_C = \sqrt{\omega^2_0 - \delta^2}$.

В связи с тем что в течение вспышки происходит сильное изменение $r_л$, (20.10) и (20.11) используются только для получения качественных соотношений.

20.3. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП

К основным конструктивным элементам импульсных ламп относятся: колба и газовое наполнение; электродные узлы (катодный, включающий в себя катод, газопоглотитель, ввод в стекло и внешний вывод; анодный — анод, ввод, внешний вывод и управляющий электрод); элементы внешнего оформления (цоколь, специальные приспособления для работы лампы и др.).

Рассмотрим основные технические решения, используемые в серийных лампах. Колба импульсных ламп изготавливается из обычного или кварцевого стекла. В зависимости от светотехнических требований ей придается соответствующая форма. В случае, если задается энергия вспышки, исходя из требуемого уровня освещенности на объекте, то на основании ориентировочной световой отдачи (рис. 20.1) оценивается энергия разряда, которая должна подводиться к лампе от конденсатора. Предельная нагрузка на импульсную лампу может быть

выражена эмпирической формулой

$$\left(\frac{CU^4_0}{l^3}\right)=k, \qquad (20.12)$$

где k — постоянная, зависящая в основном от материала колбы и в меньшей степени от рода и давления газа.

Введя понятие «фактора нагрузки», равного $CU_0^4=4w^2/C$, и подставив в (20.12) экспериментальные значения k для кварцевого стекла, получим [28]:

$$W\approx 20\,000 r_к l\sqrt{\tau}, \qquad (20.13)$$

что позволяет определить для предельных условий расстояние l между электродами при различных значениях внутреннего радиуса трубки $r_к$.

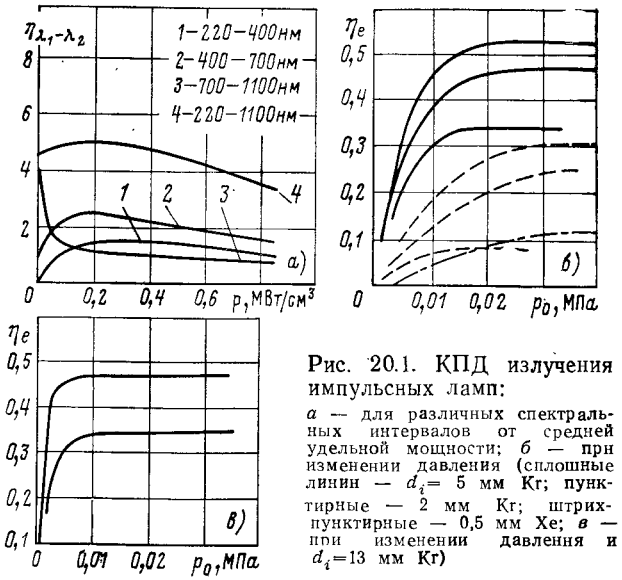


Рис. 20.1. КПД излучения импульсных ламп:

а — для различных спектральных интервалов от средней удельной мощности; *б* — при изменении давления (сплошные линии — d_i= 5 мм Кг; пунктирные — 2 мм Кг; штрих-пунктирные — 0,5 мм Хе; *в* — при изменении давления и d_i=13 мм Кг)

Полученные значения сопоставляются с необходимыми геометрическими размерами светящегося тела. Технологические и экономические факторы определяют материал, используемый при изготовлении колбы.

При заданной длительности вспышки расчет дополняется требованием соответствия l и d требуемому значению τ. При τ более 30 мкс выполняется соотношение (20.7), что с учетом (20.12) дает:

$$d_к\approx 0{,}07\tau^{-1/2}(C^7U_0^7/k^{3/2})^{1/9} \qquad (20.14)$$

и

$$l=1{,}1U_0^{4/3}(C/k)^{1/3},$$

где $k\simeq 5$ мкФ·кВ⁴·см⁻³ для кварцевых ламп.

Размеры колбы шаровых импульсных ламп определяются, исходя из допустимой средней мощности, отнесенной к 1 см² поверхности колбы. Толщина стенки обычно выбирается в пределах 1,5—3 мм. Если светотехнические параметры могут быть достигнуты при давлении наполняющего газа до 0,1 МПа, то колба лампы обычно имеет цилиндрическую форму; при больших давлениях ей придается форма, близкая к шаровой.

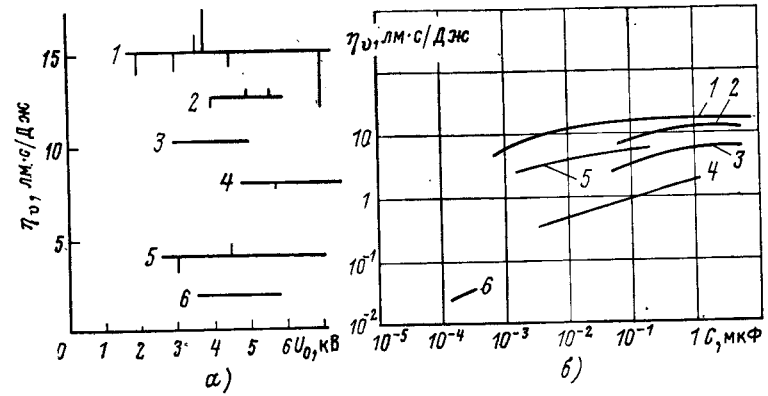


Рис. 20.2. Зависимость световой отдачи импульсных ламп:

а — от напряжения питания (*1* — Хе; *2* — Хе+30% H_2; *3* — H_2; *4* — Кг+30% H_2; *5* — Ar; *6* — Ar+30% H_2); *б* — от емкости питающего конденсатора (*1* — Хе; *2* — Кг; *3* — Ar; *4* — N_2; *5* — воздух; *6* — H_2)

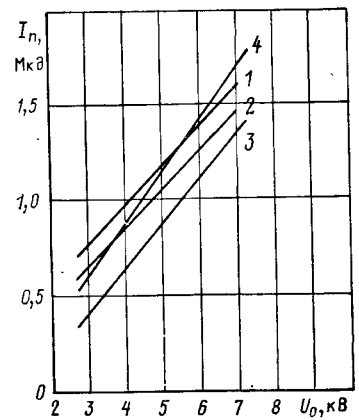


Рис. 20.3. Зависимость пиковой силы света от напряжения питания (l=5 мм, диаметр лампы 26 мм, C=0,5 мкФ):

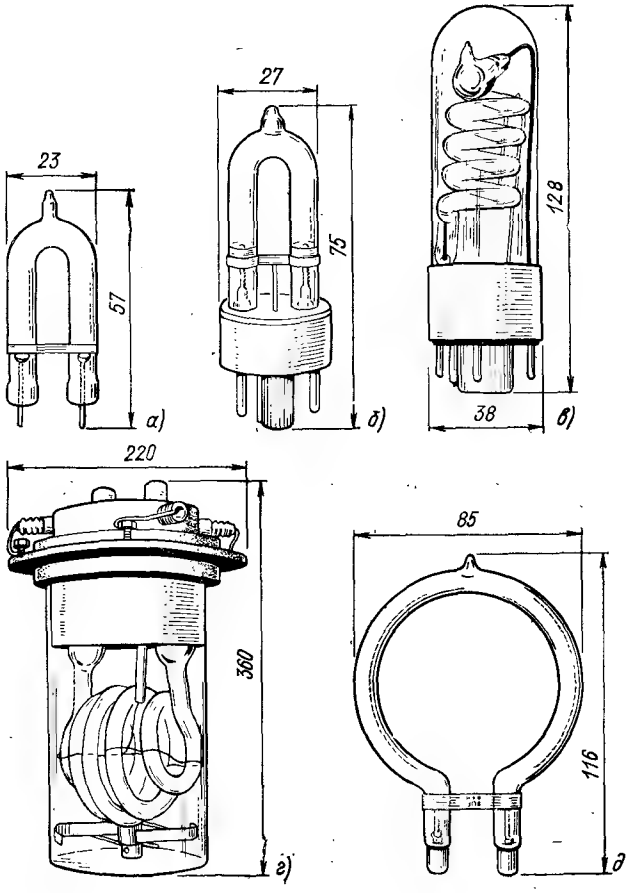
1 — Хе; *2* — Кг; *3* — Ar (все три газа при p=0,3 МПа); *4* — 0,066 МПа Хе+0,026 МПа N_2

Большинство импульсных ламп наполняется ксеноном, для них характерны минимальный КПД почти во всем диапазоне длин волн и наибольшая долговечность. Выбор давления ксенона обычно является компромиссом между наибольшей эффективностью лампы и напряжением зажигания. Шаровые импульсные лампы обычно наполняются ксеноном или смесью ксенона с легкими молекулярными газами (водородом, азотом). Зависимость световой отдачи импульсных ламп для различных условий работы приведена на рис. 20.2. На рис. 20.3 дана

зависимость пиковой силы света от напряжения питания для нескольких режимов работы.

Практически во всех типах ламп применяются металлические стержневые вводы из прутков вольфрама, молибдена или специальных сплавов. Меньшее распространение в стеклянных лампах получили дисковые или многостержневые вводы. В кварцевых импульсных лампах наиболее часто используются плоские фольговые, цилиндрические фольговые, стержневые вводы на переходных стеклах, колпачковые с уплотнением мягкими припоями.

В качестве зажигающего электрода ламп применяется токопроводящая полоса, нанесенная на колбу лампы и изолированная от ее вводов. Для сильно нагревающихся во время работы ламп в качестве



зажигающего электрода используются несколько витков никелевой проволоки, навитой на колбу.

20.4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Трубчатые импульсные лампы представляют собой трубку из тугоплавкого стекла или кварца, на концах которой впаяны электроды. Как правило, расстояние между электродами намного больше внутреннего диаметра трубки, который колеблется от долей до нескольких десятков миллиметров. Длина трубки может достигать в некоторых конструкциях нескольких метров. Давление наполняющего газа изменяется от десятых долей до десятков килопаскалей. Трубке лампы придается спиральная, кольцевая, V-образная или более сложная форма. Трубчатые лампы имеют высокую световую отдачу. Длительности импульсов — от 10^{-5} до 10^{-2} с. Максимальная энергия вспышки достигает нескольких десятков тысяч джоулей.

Для шаровых ламп характерны сравнимые расстояния между электродами по отношению к диаметру колбы. Вследствие этого разрядный промежуток занимает малую часть объема лампы, т. е. не ограничивается размерами колбы. Колба лампы представляет собой стеклянный или кварцевый шар со впаянными основными (и иногда зажигающими) электродами. Давление наполняющего газа составляет

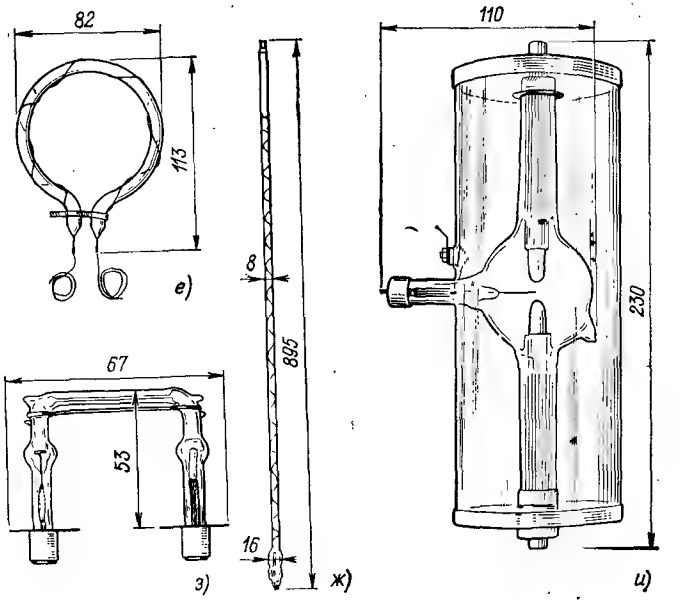


Рис. 20.4. Общий вид импульсных ламп:
а — ИФК-120; *б* — ИСК-10; *в* — ИФК-500; *г* — ИФК-80 000; *д* — ИФБ-300; *е* — FA4 (Англия); *ж* — ИФП4000; *з* — ИСП15; *и* — ИСШ500

Таблица 20.1

Тип лампы*, материал колбы	Форма светящей части	Размеры тела свечения, мм			Энергия вспышки, Дж	Рабочее напряжение на лампе, В	Срок службы, тыс. вспышек	Длительность вспышки, мс	Амплитудная сила света, Мкд
		Диаметр	Длина	Ширина					
ИФК-20, стекло	Прямая	4	14		20	130	30	0,2	0,1
ИФК-120, стекло	U-образная		30	23	120	300	10	1	0,25
ИФК-500, стекло	Спираль		45	30	500	500	5	8	0,13
ИФК-80000, кварц	Спираль	132			80 000	6000	—	6	36
ИСК-10, стекло	U-образная		30	23	0,05	300	36 000	0,015	0,0005
ИСК-250, кварц	П-образная		67	45	250	450	100	0,7	1,3
ИФП-15000, кварц	Прямая	10	580		15 000	24 000	10	4,5	10
ИФБ-300, стекло	Кольцо	85		8	300	300	10	8	0,06
ИФТ-200, кварц	Диск	6			200	200	1	10	0,02
ИСП-70, кварц	Прямая	0,5	70		0,18	1200	150 000	0,025	0,006
ИСШ-500, кварц	Прямая	1,2	8		5	9000	360	0,006	1

* Обозначение типа ламп: первая буква И — импульсная; вторая Ф или С — фотоосветительная или стробоскопическая; третья — характеризует форму светящего тела лампы. Для фотоосветительных ламп: К — компактная, П — прямая колба, Б — кольцевая трубка. Для стробоскопических ламп: Т — трубчатая лампа, Ш — шаровая колба.

от десятых долей до единиц мегапаскалей. Расстояние между электродами колеблется в диапазоне нескольких миллиметров. Лампы создают вспышки длительностью менее 10^{-4}—10^{-5} с со значительно большей яркостью, чем трубчатые, однако обладают меньшими световой отдачей и энергией вспышки.

В табл. 20.1 приведены параметры, а на рис. 20.4 общий вид некоторых импульсных ламп.

Глава двадцать первая

МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫЕ ЛАМПЫ

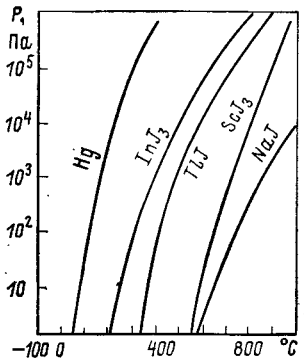
До начала 50-х годов, несмотря на значительное разнообразие источников излучения высокого давления, число видов их наполнения оставалось достаточно ограниченным. Однако существовал ряд элементов, спектр излучения которых при введении в газовый разряд мог позволить создать весьма эффективные источники света. Так, если спектр ртутных паров дает в видимой части до 23% всего излучения, то излучение ряда элементов таблицы Д. И. Менделеева составляет в видимой части до 50% и более всей излучаемой энергии. Следовательно, если световая отдача ртутной лампы достигает 55—60 лм/Вт, то источник света, созданный на базе излучения некоторых элементов, мог иметь световую отдачу свыше 100 лм/Вт. Однако практическая реализация новых источников затруднялась из-за весьма низкой упругости паров большинства элементов при допустимых рабочих температурах колбы лампы, изготовленной из кварцевого стекла. В начале 50-х годов был реализован способ создания необходимой концентрации элементов в объеме газоразрядного промежутка за счет возгонки паров легко испаряющихся соединений. Соединениями, отвечающими указанному требованию, оказались галогенные соли металлов. Возгоняясь при сравнительно невысоких рабочих температурах кварцевой колбы, эти соединения диссоциируют при горении дуги на атомы, при этом в разряде возбуждается атомный спектр. В «холодных», периферийных зонах разряда происходит ассоциация атомов в молекулы соли. Таким образом, в колбе лампы осуществляется замкнутый галогенный цикл, находящийся в динамическом равновесии. Дополнительным достоинством галогенных солей металлов по сравнению с другими простыми соединениями оказалось то, что бром, и в особенности йод, мало или практически совсем не реагирует с электродами и кварцевым стеклом. В настоящее время осуществляется изучение разнообразных галогенных соединений элементов и их сочетаний с целью создания эффективных источников излучения.

21.1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СТОЛБА РАЗРЯДА С ДОБАВКАМИ ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ. ВЫБОР ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Введение в колбу лампы металлогалогенных соединений позволяет создать концентрацию паров, достаточную для получения интенсивного излучения металлов, входящих в состав соединения. На рис. 21.1 приведены зависимости давления паров от температуры для ряда металлов и их галогенных соединений. Однако эти концентрации являются недостаточными для получения удельных электрических характеристик плазмы, обеспечивающих

большие удельные мощности, а следовательно, и значительные потоки излучения. В связи с этим большую роль играет среда из ртутных паров (аналогично ртутным лампам), к которым дополнительно добавляются галогенные соединения металлов, принимающих участие в основном в излучении. Из-за указанного разделения функций ртутный пар получил название «ртутного буфера», а галогенные соединения называются излучающими добавками.

Газоразрядная плазма металлогалогенных ламп представляет собой многокомпонентную систему, определение состава которой значительно затруднено по сравнению с плазмой ртутного разряда. Изменение температуры от



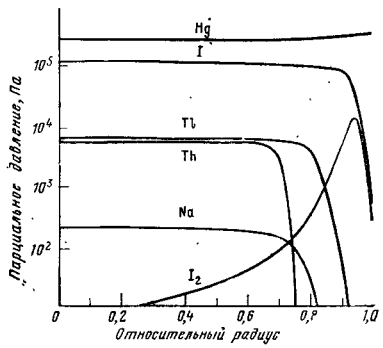


Рис. 21.2. Распределение компонентов в системе, содержащей торий, таллий, натрий, ртуть и йод при суммарном давлении 0,4 МПа и от-

Рис. 21.2. Распределение компонента в системе, содержащей торий, галлий, натрий, ртуть и йод при суммарном давлении 0,4 МПа и отношении I: Hg=4÷10

периферии разряда к оси (от 900 до 6000 К) приводит к формированию зон с характерными, доминирующими для каждой из них процессами: зоны ассоциации атомов в соединения вблизи стенки; зоны диссоциации соединений на атомы (ближе к оси разряда), зоны излучающего разрядного промежутка (в области максимальной проводимости, по оси лампы и вблизи нее). Для каждой зоны необходимо рассматривать системы уравнений каждого из названных процессов.

Так, процессы диссоциации соединений в условиях динамического равновесия описываются законом действующих масс

$$k_p = \prod_{i=1}^{n} p_i^{\nu_i}, \qquad (21.1)$$

где k_p — константы равновесия реакции; p_i — парциальное давление i-го компонента.

При этом в системах с несколькими одновременно протекающими реакциями их следует рассматривать во взаимосвязи, т. е. решать систему уравнений (21.1). Смесь йодидов индия, таллия и натрия, вводимая в виде добавки в ртутную дугу, имеет 12 разновидностей химических соединений и элементов, связанных между собой семью химическими реакциями. Вычисления в связи с этим для каждого конкретного случая весьма затруднены. На рис. 21.2 приведены данные расчета распределения компонентов по сечению разрядной трубки для простой системы.

Аналогичным образом обстоит дело с определением концентрации электронов через значения степеней ионизации при многокомпонентной системе. В случае низкого потенциала ионизации какого-либо компонента решение этой задачи значительно усложняется, так как возможна двукратная и выше ионизация атомов. Для этого случая имеем систему уравнений

$$\beta_{im} = 1 - \frac{x_{(i-1)\,m}}{n_m\,(1 - x_e) - \sum\limits_{k=0}^{k=i-1} x_{(k-1)\,m}}, \qquad (21.2)$$

где i — кратность ионизации; m — номер элемента; n_m — число молей m-го элемента; $\beta_{im} = n_{im}/n_{(i-1)m}$.

Системы (21.1) и (21.2) получены в предположении наличия локального термодинамического равновесия, которое [3] правомочно для металлогалогенных ламп (МГЛ).

Значительные трудности определения проводимости плазмы МГЛ привели к тому, что в большинстве случаев градиент потенциала в столбе находится либо экспериментально, либо принимается для ориентировочных расчетов несколько меньшим, чем градиент ртутного разряда в аналогичных условиях.

В плазме с локальным термодинамическим равновесием заселенность n_k возбужденного состояния равна:

$$n_k = n_0 \frac{g_k}{g_0} e^{-eU_k/kT}. \qquad (21.3)$$

Суммарное излучение линий без учета самопоглощения

$$\Phi = \frac{n_0}{g_0} \sum_k \frac{g_k h\nu_{jk} e^{-eU_k/kT}}{\tau_{kj}}. \qquad (21.4)$$

Зависимость (21.4) можно записать в виде

$$\Phi = n_0 \bar{A} h\bar{\nu} e^{-e\bar{U}_в/kT},$$

где $\bar{A}$, $h\bar{\nu}$, $\bar{U}_в$ — эффективные величины, для вероятностей перехода, энергии квантов, потенциала возбуждения.

В табл. 21.1 приведены расчетные значения эффективных потенциалов ионизации и возбуждения для различных элементов.

Таблица 21.1

Элемент	U_i, эВ	$\bar{U}_в$, эВ	Элемент	U_i, эВ	$\bar{U}_в$, эВ
Ртуть	10,43	7,79	Торий	6,00	3,46
Таллий	6,11	3,74	Уран	6,00	3,24
Скандий	6,54	3,37			

Определение излучения отдельных линий с учетом самопоглощения для модели канала с постоянными температурой T и радиусом канала $R_к$ дает для различных видов взаимодействия атомов, приводящих к уширению контура линии излучения, следующее выражение для дисперсионного контура (на основании теории о взаимодействии соударяющихся частиц)

$$I_{\lambda i} \approx c_1 e^{-Em/kT} R_к^{3/2}. \qquad (21.5)$$

Характерным для различных видов взаимодействия атомов является то, что излучение пропорционально радиусу канала $R_к$ в степени от 1 до 2. Излучение «черного» излучателя при температуре T должно быть пропорционально $R_к$ в степени 1, абсолютно прозрачного — в степени 2. Для линий, излучающих добавок, независимо от вида уширения показатель степени при $R_к$ изменяется мало и находится в пределах от 1,4 до 1,72.

Так как теория столба МГЛ находится в настоящее время в начальной стадии, расчеты носят ориентировочный характер и для практических результатов необходимо использовать экспериментальные данные, подвергаемые при необходимости экстраполяционной обработке. Экспериментально изучены соединения около 60 элементов. Из них неэффективными оказались кальций, стронций, барий и некоторые другие (около десяти элементов). Все соединения можно условно разделить на две группы: с резко выраженным линейчатым излучением и малым чис-

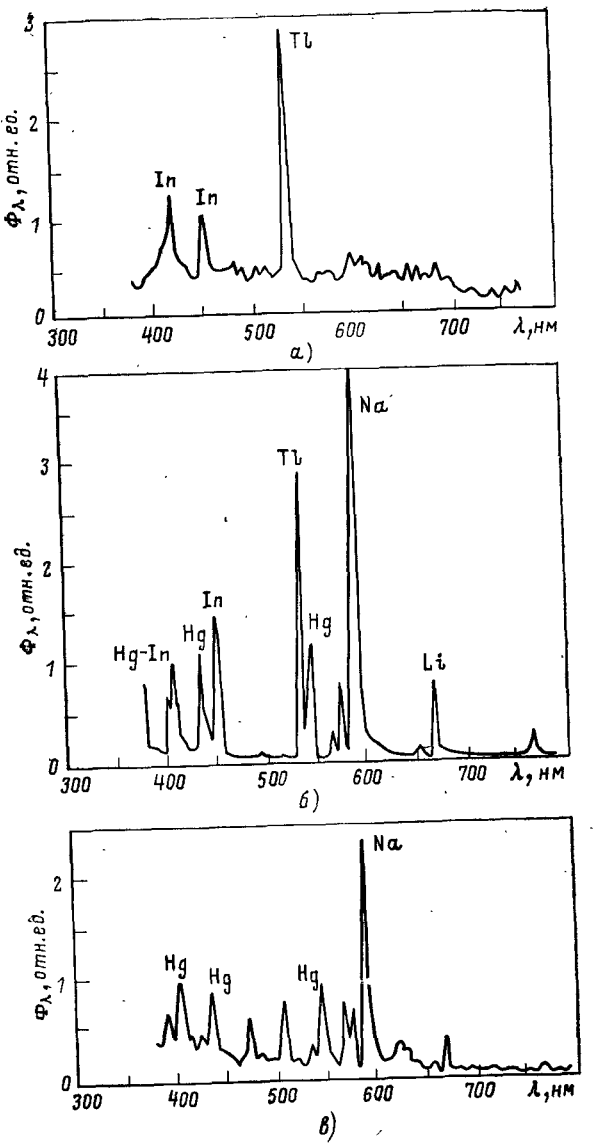


Рис. 21.3. Распределение энергии на единицу длины волны в спектре различных типов ртутных металлогалогенных ламп:

а — индий — таллий — диспрозий; *б* — индий — таллий — натрий — литий; *в* — скандий — натрий

лом линий, имеющих многолинейчатый спектр, приближающийся к сплошному, и редкоземельные элементы, излучающие многолинейчатый «белый» спектр. Представителями первой группы являются элементы III группы таблицы Д. И. Менделеева, излучающие характерные резонансные дуплеты. На рис. 21.3 представлены спектры некоторых МГЛ, содержащих названные соединения.

Выбор наполнения МГЛ определяется областью применения источника. Так, для наиболее широкой области применения газоразрядных ламп — общего освещения наиболее важный параметр — световая отдача, на которую накладывается ряд дополнительных требований. Основное из них — цветность излучения, которая для МГЛ задается в виде цветовых координат (цветовой температуры) для данного спектра. Исходя из специфики восприятия излучения органом зрения человека, который воспринимает сочетание излучения линейчатого спектра трех линий с определенными длинами волн как «белый» свет, была создана серия МГЛ различной мощности с добавками Na(λ=596 нм); Tl(λ=535 нм) и In(λ=451 нм), имеющих при высокой световой отдаче (более 100 лм/Вт) удовлетворительную цветность. Для обеспечения высококачественной цветопередачи ($R_a \geqslant 80$) используется наполнение, состоящее из соединений редкоземельных элементов.

Специальные источники излучения (для технологических целей и т. п.) должны обеспечивать максимальную эффективность процесса, т. е. максимум излучения должен соответствовать максимуму кривой чувствительности процесса. В таких МГЛ в качестве наполнения используются элементы, создающие резко выраженный линейчатый спектр. Например, для целей полиграфии наиболее эффективным оказывается источник на базе ртутно-галлиевого разряда (длины волн 401 и 417 нм).

21.2. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫХ ЛАМП

По внешнему виду металлогалогенные лампы не отличаются от ртутных ламп. Однако специфика вводимых добавок приводит к необходимости учета ряда факторов при конструировании источника излучения. Кварцевая горелка с двумя основными электродами (в некоторых случаях с поджигающим электродом) помещается в наружную колбу, чаще всего из тугоплавкого стекла, по размерам и форме подобную колбе ртутной лампы той же

мощности. Требование создать необходимую упругость паров добавок ужесточает тепловой режим горелки. В связи с этим форма горелки лампы и технология ее изготовления должны обеспечивать бо́льшую равномерность распределения температуры по внутренней поверхности с увеличением абсолютного значения минимальной температуры до 725—750 °С. Это требование приводит к необходимости «утепления» заэлектродных областей горелки при помощи отражающих покрытий, вакуумирования внешней колбы для уменьшения теплоотвода от горелки. Расчет геометрических размеров горелки и дозировок ртути и добавок проводится аналогично расчету этих параметров для ртутной лампы с учетом зависимостей, полученных для МГЛ экспериментально. Следующая особенность состоит в том, что многие элементы (особенно многолинейчатые) приводят к «стягиванию» разряда, что вызывает нестабильность разряда, увеличение напряжения на дуге.

Таблица 21.2

Страна (фирма), тип лампы	Мощность, Вт	Ток, А	Световой поток, клм	Индекс цветопередачи	Срок службы, ч	Форма колбы
ССР, ДРИ250-5	250	2,1	19	60	10 000	Эллипсоидная
ДРИ250-6	250	2,1	19	60	3000	Цилиндрическая
ДРИ400-5	400	3,3	35	60	10 000	Эллипсоидная
ДРИ400-6	400	3,3	33	60	3000	Цилиндрическая
ДРИ700-5	700	6,0	60	60	9000	Эллипсоидная
ДРИ700-6	700	6,0	56	60	3000	Цилиндрическая
ДРИ1000-5	1000	4,7	90	60	9000	Эллипсоидная
ДРИ1000-6	1000	4,7	90	60	3000	Цилиндрическая
ДРИ2000-6	2000	9,2	200	60	2000	»
ДРИ3500-6	3500	16,0	350	60	1500	»
ДРИ400-1*	400	3,2	25	75	1000	»
ДРИ1000-1*	1000	9,5	80	75	1000	»
ДРИ2000-1*	2000	10,3	170	80	800	»
ДРИ3500-1*	3500	18,0	300	85	600	»
ДРИШ575	575	7,0	44	85	300	Шаровая
ДРИШ1200	1200	13,5	100	80	150	
ДРИШ2500	2500	26,0	220	80	100	»
ДРИШ4000	4000	28,0	370	80	1000	»
Франция (Mazda)	400	3,4	32	68	7500	Цилиндрическая
США (General Electric)	400	3,2	34	65	15 000	»
ФРГ (Osram)*	1000	8,8	85	85	2000	»
Нидерланды (Philips)	1000	82,0	90	65	3000	»

* С мгновенным повторным зажиганием.

Для стабилизации диаметра канала разряда стенками горелки вводят уширяющие добавки (йодиды натрия, цезия).

Для многокомпонентного наполнения МГЛ характерны большие проявления конвекции и термодиффузионного разделения компонентов, что приводит к значительному выгибанию канала разряда при горизонтальном положении горения, «расслоению» излучения по длине горелки. Для устранения расслоения приходится ограничить соотношение длины трубки к ее диаметру (не более 4 : 1) или подбирать комбинации добавок йодидов металлов для исключения последствий термодиффузии. Для ликвидации результирующего влияния изменения формы дуги за счет конвективных процессов горелку изготавливают в некоторых случаях с диаметром, увеличивающимся к верхнему электроду (вертикальное положение горения), или изогнутую дугой вверх (горизонтальное).

Специфика электродных узлов состоит прежде всего в изменении активатора. Так как галогенные соединения взаимодействуют с окислами бария и кальция, то в МГЛ применяются в основном электроды из торированного вольфрама; вольфрамовые, активированные окисью тория, и, реже, чисто вольфрамовые.

Из-за наличия в горелке МГЛ электроотрицательных галогенов напряжение зажигания и повторного зажигания МГЛ выше, чем у ртутных ламп. В связи с этим лампы снабжаются зажигающим электродом, соединенным через резистор с противоположным выводом. Большинство МГЛ имеет двухэлектродную конструкцию, а для их зажигания используются специальные полупроводниковые зажигающие устройства, генерирующие высоковольтные импульсы (2—4 кВ).

Существующие МГЛ можно подразделить на две основные категории: лампы с преобладающим излучением атомов добавок (к ним относятся одно- и многокомпонентные МГЛ) и лампы с преобладающим излучением молекулярных примесей (наполнение таких ламп образует комплексные соединения, излучающие сплошной спектр).

В табл. 21.2 приведены данные по некоторым типам МГЛ, выпускаемым в СССР и за рубежом для целей общего освещения.

21.3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТИПЫ МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫХ ЛАМП. ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

Специфические требования кинофотосъемочной техники, а также освещения при передачах цветного телевидения привели к созданию серии ламп с компактным телом свечения, со спектром, близким к солнечному. На основе ртутного разряда с добавками галогенидов редкоземельных металлов были разработаны шаровые лампы, имеющие световую отдачу 90 лм/Вт, индекс цветопередачи 85 и цветовую температуру 6000 К. Лампы имеют эллипсоидную колбу длиной 60 мм при мощности 4000 Вт. Спектр одной из таких ламп приведен на рис. 21.4. Использование йодида и бромида олова позволило создать лампы с излучением, весьма близким к солнечному спектру, в диапазоне 300—500 нм. Лампы с добавками йодидов металлов III группы таблицы Д. И. Менделеева (Tl, In, Ga) успешно применяются в фотохимии, множительной технике, полиграфии. Добавки йодидов свинца и висмута в ртутные трубчатые лампы позволяют почти в 2 раза поднять КПД излучения в области 300—400 нм. Эти источники с успехом могут применяться в мебельной промышленности для полимеризации лаковых покрытий.

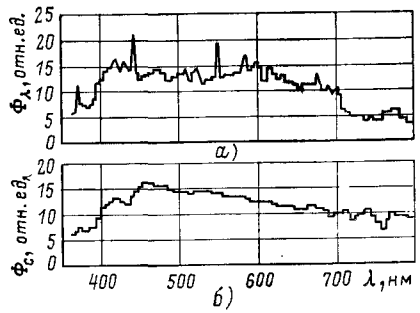


Рис. 21.4. Распределение энергии в спектре металлогалогенной лампы и Солнца:

а — лампа ДРИШ575; *б* — спектр Солнца

Специфика конструирования МГЛ заключается в том, что к ним чаще всего предъявляются требования, относящиеся к геометрическим размерам светящего тела. Для протяженных МГЛ это заставляет решать проблему исключения расслоения разряда по длине горелки. Применение ламп в специальных аппаратах вызывает также необходимость решения ряда конструктивных вопросов, связанных с условиями техники безопасности (электрозащита, взрывобезопасность, специальные системы охлаждения и др.). Указанное накладывает определенные ограничения на конструктивные параметры МГЛ и требует взаимной увязки последних с параметрами аппарата, в котором они используются.

Глава двадцать вторая

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В КОЛБАХ ИЗ КЕРАМИКИ

22.1. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Требование создать достаточно высокую концентрацию излучающих атомов в объеме газоразрядной лампы, а также высокая химическая активность ряда элементов по отношению к кварцевому стеклу привели к необходимости поиска новых материалов для колб этих ламп. В начале 60-х годов была освоена промышленная технология получения трубок из порошка поликристаллической окиси алюминия методом высокотемпературного спекания. Созданы и изучаются образцы источников излучения высокого давления с парами натрия, цезия, рубидия, калия.

Несмотря на то что основные элементы газоразрядной лампы высокого давления с горелкой из керамики являются теми же, что и для других газоразрядных ламп (например ртутно-кварцевых), специфика применяемых материалов приводит к отличиям в принципах конструирования. В первую очередь это касается конструкции горелки лампы. Применение для нее в качестве материала окиси алюминия позволяет, в принципе, повысить рабочую температуру колбы лампы до 1500—1600 °С. При формировании трубки из исходного сырья и после дальнейшего высокотемпературного спекания получают керамический материал (поликор), оптически прозрачный для излучения в диапазоне от 300 до 1500 нм, с диффузным характером индикатрисы пропускания. Так как спеченная окись алюминия имеет кристаллическую структуру, что при нагреве до температуры плавления приводит к растрескиванию, то не удается изготовить колбы лампы с запаянными вакуумно-плотными вводами по традиционной технологии. Используется вариант спая керамика—металл. Примерами такого соединения являются варианты так называемого колпачкового спая с торцом горелки или спая «заглушки» из того же материала, что и материал горелки, с торцом трубки колбы. Металлический колпачок ввода обычно делается из ниобия, имеющего термический коэффициент расширения, близкий в диапазоне рабочих температур к термическому коэффициенту расширения поликора. Пайка осуществляется либо твердым припоем, либо при помощи стекловидного цемента.

Из-за необходимости обеспечения предельно высоких рабочих температур, а также в связи с интенсивным окислением деталей выводов, изготавливаемых из ниобия, горелка помещается в вакуумную наружную колбу. Поддержание высокого вакуума в течение срока службы обычно осуществляется при помощи размещаемых внутри наружной колбы геттеров. В связи с этим тепловой баланс горелки лампы определяется в основном тепловым излучением. Схема расчета лампы остается той же, что и при расчетах ртутно-кварцевых ламп.

Сложность технологического процесса изготовления трубок из поликора, приводящая к относительно высокой их цене, значительно ограничила возможность варьирования диаметра горелок для серийно выпускаемых ламп. В настоящее время в подавляющем большинстве промышленно освоенных ламп применяется горелка с внешним диаметром 9 мм.

22.2. НАТРИЕВЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ

Получение высококачественных трубок из мелкоразмолотого поликора высокой чистоты позволило осуществить серийный выпуск газоразрядных источников света. Основные характеристики этого материала: газонепроницаемость, химическая стойкость, механическая прочность, более высокая, чем у монокристалла, термостойкость, достаточная, чтобы выдержать быстрый рост температуры после зажигания лампы (примерно 350 °С за 50 с) и обеспечить длительную работу при температуре до 1300 °С в контакте с парами Na. Трубки диаметром 9—10 мм с толщиной стенки 0,7—1 мм пропускают 90—95% рассеянного и 20% прямого излучения.

При увеличении давления паров Na растет интенсивность резонансного дублета 589—589,6 нм и достигает максимума при давлении паров 0,35 Па, что соответствует температуре 260 °С. При дальнейшем увеличении температуры увеличивающееся поглощение дуплета парами Na приводит к росту неизлучательных (тепловых) потерь и резкому снижению световой отдачи. После достижения максимума световая отдача вновь возрастает с ростом температуры. При давлении 1,3 кПа наступает выравнивание электронной, ионной и атомной температур пара Na, при этом дублет сильно уширяется и появляется сильное излучение за его пределами. Световая отдача лампы

$$\eta_л = \eta_{ст}(1 - U_{а.к}/U_л)\left(1 - \frac{2\Delta l_{эл}}{R_{тр}}\right), \qquad (22.1)$$

откуда видно, что получение максимального значения $\eta_л$ связано с реализацией условий максимальной световой отдачи положительного столба $\eta_{ст}$. Максимум $\eta_{ст}$ для паров чистого Na наступает при давлении около 13 кПа (т. е. при температуре приблизительно 700 °С).

Излучение натриевого разряда позволило оптимизировать характеристики ламп путем введения Na в виде амальгамы и добавки ксенона, что увеличивает световую отдачу почти в 1,5 раза за счет роста градиента при одновременном снижении теплопроводности. С ростом тока световая отдача растет, положение максимума несколько смещается в сторону меньших температур. При одинаковых давлении паров натрия и мощности ламп увеличение внутреннего диаметра трубки приводит к заметному снижению КПД лампы.

Для создания ламп с высоким значением $\eta_л$ (до 97% от $\eta_{ст}$) параметры необходимо выбирать следующим образом: 1) амальгама с атомным содержанием натрия — в диапазоне 0,60—0,85; 2) температура амальгамы — в диапазоне 640—680 °С; 3) ток — максимальный из возможных для данной мощности; 4) диаметр разрядной трубки — наименьший из возможных; 5) значения $U_л$ и $l_{эл}$ наибольшие.

Напряжение на лампе $U_л$, исходя из условий ее стабильной работы, с точки зрения повторного зажигания $U_{з,п}$, определяется следующим соотношением:

$$\frac{U_л}{U_с} \leqslant \sqrt{\frac{2}{\pi^2/4 + (K_{з,\,п}/U_{л,\,ср})^2}}, \qquad (22.2)$$

где $U_с$ — напряжение сети; $U_{л,ср}$ — среднее за полупериод напряжение на лампе.

Для натриевых ламп $U_{з,п}/U_{л,ср} \leqslant 1{,}8$, что выше значения, полученного для ртутных и металлогалогенных ламп высокого давления. Кроме того, учитывая рост напряжения на лампе в процессе горения по эмпирической зависимости

$$U_{лτ} \approx U_{л,\,нач}(1 + 0{,}01\tau),$$

где τ — продолжительность горения, тыс. ч; $U_{лτ}$ — напряжение на лампе после τ часов горения, получаем для начального напряжения на лампе $U_{л,нач}$:

$$U_{л,\,нач} \leqslant \sqrt{\frac{2}{\pi^2/4 + (1{,}8)^2}}\,\frac{0{,}9U_с}{(1 + 0{,}01\tau)}. \qquad (22.3)$$

Для типичного случая $U_с = 220$ В; $\tau = 15\,000$ ч и $U_{л,нач} = 102$ В.

Принимая $k_л = 0{,}85$, находим ток: $I = P_л / k_л U_{л,нач}$.

Минимальное значение диаметра трубки d_2 определяется из условия теплового режима. Исходя из требования работы лампы в течение 15—20 тыс. ч без заметного почернения внешней колбы, необходимо иметь $t_{k\,max} \leqslant 1180$ °С. Так как

$$d_2 \geqslant \frac{\alpha_{ст} P_{1ст}}{\pi q_{2кер}} \qquad (22.4)$$

и известно, что

$$\alpha_{ст} = 0{,}35 + 5{,}2/P_{1ст},$$

можно определить d_2.

Поскольку разрядная трубка натриевой лампы высокого давления помещается в вакуумированную внешнюю колбу, тепловые потери с ее поверхности определяются только излучением:

$$q_2 = \varepsilon\,\sigma_0 (T^4_г - T^4_к), \qquad (22.5)$$

где ε — коэффициент излучения керамической трубки; $T_г$ и $T_к$ — температура горелки лампы и наружной колбы соответственно.

Из (22.4)—(22.5) получим:

$$d_2 \geqslant \frac{0{,}35P_{1ст} + 5{,}2}{\pi\sigma_{кер}\sigma_0 (T^4_{г,\,кер} - T^4_к)}. \qquad (22.6)$$

В дальнейшем определение d_2 сводится к нахождению оптимального значения $P_{1ст}$, что зависит, в свою очередь, от градиента потенциала E (рис. 22.1).

Градиент потенциала натриевого разряда высокого давления E резко возрастает с ростом температуры амальгамы, так как лампа работает в условиях насыщающих паров, и с увеличением содержания ртути в амальгаме и слабо падает с ростом тока. При фиксированных $t_{хол}$, m_{Na} и I градиент не зависит от диаметра (от 6 до 14 мм). Эмпирическая зависимость для E вы-

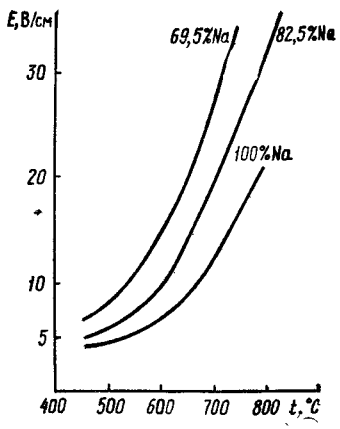


Рис. 22.1. Зависимость градиента потенциала в положительном столбе натриевого разряда от температуры холодной точки для различных соотношений ртути и натрия в амальгаме

глядит следующим образом:

$$E \cong 60 m_{Na}^{-2} \left(\frac{t_{хол}}{1000}\right)^4 I^{-0,2}, \qquad (22.7)$$

где $t_{хол}$ — °С; m_{Na} — атомная доля Na в амальгаме.

Формула (22.7) дает значение E, В/см, с точностью ±10% при m_{Na} от 0,6 до 0,85 единиц; $t_{хол}$ от 550 до 800 °С; токе от 2 до 8 А и d_1 от 6 до 14 мм.

Для найденного ранее значения тока I определяем из оптимального значения $\eta_{ст}$ значение $t_{хол}$. По значениям $t_{хол}$ строится зависимость $P_{1ст}$ в функции m_{Na} по уравнению

$$P_{1ст} = 60\, k_л\, I^{0,8}\, m^{-2}_{Na} (t_{хол}/1000)^4. \qquad (22.8)$$

Учитывая ограничения по m_{Na}, получаем область возможных значений d_2 и $P_{1ст}$. Конкретные значения d_2 и $P_{1ст}$ следует выбирать на основании конструктивных и технологических соображений. Так, минимальное значение d_2 ограничивается не только тепловым расчетом, но и конструкцией электродного узла.

В настоящее время выпускается широкий ассортимент натриевых ламп высокого давления, в частности, лампы мощностью 400 Вт имеют световую отдачу 90 лм/Вт и срок службы 5000 ч.

Ниже приводится световая отдача натриевых ламп высокого давления различной мощности:

P, Вт	70	100	125	250	400
η_V, лм/Вт	70	95	100	120	125

Тенденция создания унифицированных осветительных приборов для применения ламп типа ДРЛ, ДРИ и натриевых высокого давления побудила к появлению «дробного» мощностного ряда натриевых ламп (210 Вт взамен ДРЛ 250 Вт; 330 Вт взамен ДРЛ 400 Вт), что позволяет эксплуатировать эти лампы с теми же пускорегулирующими аппаратами. Применение ламп в матированной колбе в этих световых приборах не требует изменений в схеме, кроме добавления специального зажигающего полупроводникового блока (ИЗУ), и при меньшей потребляемой мощности обеспечивает бо́льшую освещенность.

Появились натриевые лампы в софитном исполнении, заменяющие галогенные лампы накаливания в световых приборах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Литвинов В. С., Рохлин Г. Н.** Тепловые источники оптического излучения. М.: Энергия, 1975. 248 с.
2. **Скобелев В. М., Афанасьева Е. И.** Источники света и пускорегулирующая аппаратура. М.: Энергия, 1973. 368 с.
3. **Уэймаус Д.** Газоразрядные лампы. М.: Энергия, 1977. 244 с.
4. **Ртутные** лампы высокого давления: Пер. с англ./ Под ред. И. М. Весельницкого и Г. Н. Рохлина. М.: Энергия, 1971. 328 с.
5. **Рохлин Г. Н.** Газоразрядные источники света. М.: Энергия, 1966. 560 с.
6. **Гуторов М. М.** Основы светотехники и источники света. М.: Энергия, 1968. 392 с.
7. **Вознесенская З. С., Скобелев В. М.** Электрические источники света. М.: Госэнергоиздат, 1957. 216 с.
8. **Иванов А. П.** Электрические источники света. М.: Госэнергоиздат, 1955. 288 с.
9. **Ульмишек Л. Г.** Производство электрических ламп накаливания. М.: Энергия, 1966. 640 с.
10. **Федоров В. В.** Производство люминесцентных ламп. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.
11. **Денисов В. П.** Производство электрических источников света. М.: Энергия, 1975. 488 с.
12. **Охонская Е. В., Решенов С. П., Рохлин Г. Н.** Электроды газоразрядных ламп. Саранск: Мордовский государственный университет, 1978. 92 с.
13. **Казанкин О. Н.** Неорганические люминофоры. Л.: Химия, 1975. 192 с.
14. **Бутаева Ф. А.** Роль линии 1850 Å в световой отдаче люминесцентных ламп. — Светотехника, 1959, № 7, с. 17.
15. **Гуревич М. М.** Цвет и его измерение. М.: АН СССР, 1950. 268 с.
16. **Бутаева Ф. А., Фабрикант В. А.** О резонансном излучении разряда в смеси паров ртути и аргона. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1945, т. 9, № 3, с. 230—232.
17. **Фабрикант В. А.** Физика и техника люминесцентных ламп. — УФН, 1945, № 27, вып. 2, с. 159—198.
18. **Весельницкий И. М.** Определение оптимальных параметров и некоторые вопросы конструирования люминесцентных ламп повышенной мощности. Автореферат кандидатской диссертации (ВЭИ), 1967.
19. **Ильмас Э. Р., Лущик Ч. Б.** Спектральные трансформаторы с фотонным умножением для неоновых люминесцентных ламп. Спектральные трансформаторы с фотонным умножением. — Тр. ИФА АН ЭССР, 1972, вып. 40, с. 3, 23.

20. **Литвинов В. С., Троицкий А. М.** Учебное пособие по курсовому проектированию источников света. МЭИ, 1975. 116 с.
21. **Грановский В. Л.** Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 432 с.
22. **Капцов Н. А.** Электрические явления в газах и вакууме. М.: Гостехиздат, 1950. 833 с.
23. **Михеев М. А.** Основы теплопередачи. М.: Госэнергоиздат, 1956. 390 с.
24. **Теплотехника**/ Под ред. И. Н. Сушкина. М.: Металлургия, 1973. 478 с.
25. **Финкельбург В., Меккер Г.** Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 370 с.
26. **Эспе В.** и **Кноль М.** Технология электровакуумных материалов, т. 1. Металлы и материалы с металлической проводимостью: Пер. с нем. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1962. 631 с.
27. **Прянишников В. П.** Кварцевое стекло. М.: Стройиздат, 1956. 182 с.
28. **Импульсные** источники света/ Под ред. И. С. Маршака. М.: Энергия, 1978. 472 с.
29. **Маршак И. С.** Современные высокоинтенсивные источники света. М.: ВИНИТИ. Сер. светотехника и инфракрасная техника, т. 4, 1976. 146 с.
30. **Вугман С. М., Волков В. И.** Галогенные лампы накаливания. М.: Энергия, 1980. 136 с.
31. **Основы** вакуумной техники/ А. И. Пипко, В. Я. Плисковский, Б. И. Королев, В. И. Кузнецов. М.: Энергоиздат, 1981. 432 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Адгезия люминофора 236
Азот 94
Амальгама 250
Аргон 94
Аттестация изделий 45, 52

Баланс мощности лампы накаливания 92, 114
Безопасность ламп 48
Биндер 238, 239
Биспираль 112
Больцмановский излучатель 279

Вводы в кварцевое стекло 303, 306, 336
— ламп накаливания 146
Взаимосвязь параметров ламп 84
Вибростойкость и вибропрочность 25, 74
Возвратный регенеративный цикл 184
Вольфрам 30, 105, 118
Впаи 147
Выбор давления наполняющего газа 242
Выводы 146
Выжигание биндера 239
Высота светового центра 25

Газовый разряд 189
Газопоглотитель (геттер) 42, 101, 103, 104
Газосветные лампы 257, 272
Газы 41

Держатели ламп накаливания 149, 176
Длительность вспышки 332
— импульса 331
Долговечность 26

Единая система конструкторской документации 53

Закон Вина 63
— Кирхгофа 62
— Планка 63
— Стефана — Больцмана 63
Застойный слой 130

Идеальная вольфрамовая нить 109
Изготовление люминофорной суспензии 238
Излучающие добавки 340
Излучение избирательное (селективное) 64
— сплошного спектра 280
— тепловое 62
Индекс цветопередачи 25, 206
Инертные газы 242, 243
Источники света 18, 19

Катодолюминофоры 39
Классификация ламп накаливания 69, 70
Колба ламп 153, 287, 333
Конвекция 91
Конкурентоспособность 49
Конструкция лампы 66, 194, 344
Коэффициент полного излучения 116
— почернения 65
— сердечника (керна) 112
— спектрального пропускания 158
— стабильности светового потока 27
— температурный линейного расширения 38
— — удельного электрического сопротивления 38
— усиления 23
— шага 112

КПД видимого излучения 64, 116
— ламп 24, 211
— световой 64
— энергетический 64

Красное отношение 318, 321

Криптон 94

Критическая потеря массы тела накала 89
Ксенон 94

Лампы дуговые ртутные с люминофором (ДРЛ) 316
— импульсные 330, 337
— ксеноновые с короткой дугой 327
— — трубчатые высокой интенсивности 324
— люминесцентные амальгамные 249
— — бактерицидные 193, 255
— — безртутные нетоксичные 256
— — винтообразные 253
— — W и U-образные 252
— — желобковые 252
— — кольцевые 252
— — панельные 253
— — рефлекторные 254
— — тлеющего разряда 257
— — цветные 254
— — эритемные 193, 255
— металлогалогенные 339, 344
— накаливания вольфрамовые 10
— — галогенные 70, 172—180
— — для оптических систем и приборов 69, 81
— — — специальных светотехнических целей и установок 69, 84
— — — технологических целей 69, 83
— — местного освещения 69, 77
— — метрологические 69, 83
— — общего назначения 69, 77
— — транспортные 69, 77
— — фары 70, 82

Лампы накаливания «холодного» света 184
— натриевые высокого давления 14, 351
— ртутно-накальные 319
— ртутные высокого давления 11, 13, 307, 314
— — низкого давления 12
— тлеющего свечения 257
Люминесценция 191
Люминофоры 39, 40, 192, 224, 229, 232—235, 318

Материалоемкость 46
Мойка трубок 237
Молибден 31
Мостики 149

Надежность 27
Назначение инертных газов в ртутных лампах 242
Наполнение газаразрядных ламп высокого давления 296, 335, 344
Неоновые сигнальные огни 254
Ниобий 31
Нить вольфрамовая идеальная 109
Ножка лампы 136, 138, 151, 213, 216

Обозначение ламп 20, 177
Окись алюминия поликристаллическая 35, 348
Оптимизация параметров ламп накаливания 185
Оценка качества цветопередачи 205

Параметры ламп 21, 22, 24, 25, 72, 73, 74, 251
Патентные исследования 50
Платинит 33
Проект рабочий 57
— технический 55
— эскизный 55
Производство ламп 60

Радиолюминофоры 39
Размеры габаритные 25
— присоединительные 25
Рений 32
Рентгенолюминофоры 39
Роль паров ртути 240

Световая отдача 27, 76, 182
Световой поток 22
Светораспределение 24, 71, 72
Сила света 22
Скорость испарения вольфрама 90
Спектр излучения 24
Срок службы лампы 26, 27, 200
Стабильность 22, 75, 200
Стандарт 28
Стартер 196
Стекло 33—38, 288

Тантал 31
Тарелка 143
Тело накала 105, 108, 117, 132, 135
Температура газа 275, 276
— колбы 162, 165
— размягчения стекла 38
— цветовая 24
— энергетическая 66
— яркостная 66
Тепловой режим колбы 162, 208
Теплопроводность газа 91
Термостойкость стекла 38
Технологичность 47
Типаж 46
Тлеющий разряд 256
Токопроводящая полоса 336
Токопроводящее покрытие 247
Трубка-колба люминесцентной лампы 207

Угол рассеяния полезный 24
Ударопрочность 25, 74
Ударостойкость 25, 74
Удельная проводимость плазмы 276, 277
Удельная сила излучения 280
Унификация 46
Установочная серия 60

Фотолюминесценция 190
Фотолюминофоры 39

Химическая стойкость стекла 38

Цветность излучения 24, 200
Цветопередача 25, 202
Цирконий 32
Цоколевочная мастика 247
Цоколи ламп 167, 245, 246

Черное тело 62

Штабик 140
Штенгель 140

Экраны 150
Эксплуатация ламп 66
Электродосветные лампы 273
Электроды 145, 214, 299
Электролюминофоры 39
Эффект почернения излучения 107
— экранирования излучения 107

Яркость 23
— спектральной линии энергетическая 280

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Раздел первый

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

Глава первая. **Классификация, параметры и характеристики источников света**

1.1. Классификация источников света 18
1.2. Параметры и характеристики источников света . . 21
1.3. Нормативно-техническая документация 28

Глава вторая. **Основные конструкционные материалы**

2.1. Основные группы материалов. Металлы и сплавы . . 30
2.2. Стекло 33
2.3. Люминофоры 39
2.4. Газы и другие материалы 41

Глава третья. **Элементы методологии конструирования источников света**

3.1. Некоторые особенности конструирования источников света 43
3.2. Общие требования к источникам света 44
3.3. Нормативные документы, регламентирующие разработку источников света 50
3.4. Единая система конструкторской документации (ЕСКД) 53

Глава четвертая. **Порядок проведения опытно-конструкторской работы**

4.1. Техническое задание на ОКР 54
4.2. Техническое предложение. Эскизный и технический проекты 55
4.3. Рабочий проект 57
4.4. Приемка опытно-конструкторской работы 59
4.5. Установочная серия и начало промышленного производства нового изделия 60

Раздел второй

КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Глава пятая. **Основные сведения о лампах накаливания**

5.1. Принцип действия и устройство электрических ламп накаливания 62

5.2. Классификация электрических ламп накаливания . . 69
5.3. Основные параметры и характеристики ламп накаливания 70
5.4. Эксплуатация ламп накаливания 86

Глава шестая. **Выбор газа для наполнения ламп накаливания. Газопоглотители**

6.1. Назначение и роль наполняющего газа в лампах накаливания 88
6.2. Выбор газов для наполнения ламп накаливания . . 93
6.3. Выбор давления наполняющего газа 97
6.4. Газопоглотители 100

Глава седьмая. **Расчет и конструирование тела накала ламп накаливания**

7.1. Основные требования, предъявляемые к телу накала 105
7.2. Методы расчета тела накала вакуумных ламп . . . 114
7.3. Методы расчета тела накала газополных ламп . . . 122
7.4. Выбор конструкции тела накала ламп накаливания 132

Глава восьмая. **Конструирование ножек ламп накаливания**

8.1. Назначение и устройство ножек ламп накаливания 136
8.2. Определение размеров и конструкции стеклянных элементов ножек 140
8.3. Конструирование электродов для ламп накаливания . . 145
8.4. Крепежные и вспомогательные детали ламп накаливания 149
8.5. Технические требования к ножке с телом накала . . 151

Глава девятая. **Колбы и цоколи ламп накаливания**

9.1. Назначение колб и технические требования к ним. Материал колб 153
9.2. Расчет размеров и определение формы колбы . . . 155
9.3. Тепловой режим колб 162
9.4. Цоколи электрических ламп накаливания 167

Глава десятая. **Особенности конструирования галогенных ламп. Пути совершенствования ламп накаливания**

10.1. Галогенные лампы накаливания и особенности их конструирования 172
10.2. Резервы повышения качества ламп накаливания . . 181
10.3. Оптимизация параметров ламп накаливания . . . 185

Раздел третий

КОНСТРУИРОВАНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Глава одиннадцатая. **Основные сведения о люминесцентных лампах**

11.1. Конструктивные особенности ламп 188
11.2. Влияние схем включения на конструкцию ламп . . 196
11.3. Параметры ламп 198

Глава двенадцатая. **Конструирование трубки-колбы, ножки и катода люминесцентной лампы**

12.1. Колба люминесцентной лампы 206
12.2. Ножки и электроды ламп разных типов 213

12.3. Катоды люминесцентной лампы 218

Глава тринадцатая. **Люминофоры, газовое наполнение, цоколи, токопроводящее покрытие**

13.1. Люминофоры 224
13.2. Влияние слоя люминофора на параметры ламп . . 235
13.3. Газовое наполнение 240
13.4. Конструкция цоколей 245
13.5. Токопроводящее покрытие 247

Глава четырнадцатая. **Специальные люминесцентные лампы**

14.1. Лампы с амальгамой 249
14.2. Фигурные лампы 252
14.3. Лампы некруглого сечения 253
14.4. Цветные лампы 254
14.5. Лампы направленного светораспределения 254
14.6. Эритемные и бактерицидные лампы 255
14.7. Безртутные нетоксичные люминесцентные лампы . . 256
14.8. Источники света тлеющего разряда 256

Глава пятнадцатая. **Методы расчета и способы определения эффективных вариантов люминесцентных ламп**

15.1. Назначение рассматриваемых методов 258
15.2. Основные зависимости 259
15.3. Порядок проведения расчетов 261

Раздел четвертый

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ВЫСОКОГО И СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Глава шестнадцатая. **Основные сведения о газоразрядных лампах высокого давления**

16.1. Принцип работы газоразрядных ламп высокого давления 266
16.2. История развития ламп 269
16.3. Классификация газоразрядных ламп высокого давления 270
16.4. Области применения 271

Глава семнадцатая. **Расчет и конструирование основных элементов газоразрядных ламп высокого давления**

17.1. Основные характеристики положительного столба . . 274
17.2. Колбы газоразрядных ламп высокого давления . . 287
17.3. Наполнение колб газоразрядных ламп высокого давления 296
17.4. Электроды газоразрядных ламп высокого давления. Баланс энергии электродов. Типы электродов . . . 299
17.5. Вводы, их типы и тепловой расчет 303

Глава восемнадцатая. **Ртутные лампы высокого и сверхвысокого давления**

18.1. Ртутные лампы высокого давления. Принципы конструирования ламп с естественным и принудительным охлаждением 307

18.2. Ртутные лампы с исправленной цветностью . . . 31
18.3. Специальные ртутные лампы высокого давления . . 32

Глава девятнадцатая. **Газовые лампы высокой интенсивности**

19.1. Трубчатые ксеноновые лампы высокой интенсивности 32
19.2. Ксеноновые лампы с короткой дугой 32

Глава двадцатая. **Импульсные источники света**

20.1. Общая характеристика импульсных ламп. Основные параметры 330
20.2. Основы теории и расчет импульсного разряда . . . 331
20.3. Принципы конструирования основных элементов импульсных ламп 333
20.4. Основные типы импульсных ламп и их параметры . . 337

Глава двадцать первая. **Металлогалогенные лампы**

21.1. Основы теории столба разряда с добавками излучающих элементов. Выбор излучающих элементов . . . 339
21.2. Принципы конструирования. Основные типы металлогалогенных ламп 344
21.3. Специальные типы металлогалогенных ламп. Вопросы конструирования 346

Глава двадцать вторая. **Газоразрядные лампы высокого давления в колбах из керамики**

22.1. Особенности конструирования и расчет основных элементов 348
22.2. Натриевые лампы высокого давления. Принципы конструирования. Основные типы 349

Список литературы 353
Предметный указатель 355